

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecatrónico*

PROYECTO TÉCNICO:

**“DISEÑO DE UNA MÁQUINA CORTADORA DE HILOS CNC
PARA LA EMPRESA PLASTEX S.A.”**

AUTOR:

RICARDO ANTONIO NICOLALDE BAQUERIZO

TUTOR:

ING. ÁNGEL EUGENIO CÁRDENAS CADME

COTUTORA:

ING. MÓNICA ALEXANDRA ROMERO SACOTO

CUENCA – ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Ricardo Antonio Nicolalde Baquerizo con documento de identificación N° 0150053791, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “**DISEÑO DE UNA MÁQUINA CORTADORA DE HILOS CNC PARA LA EMPRESA PLASTEX S.A.**”, mismo que ha sido desarrollado para la optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, marzo de 2021.



Ricardo Antonio Nicolalde Baquerizo

C.I. 0150053791

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:
“DISEÑO DE UNA MÁQUINA CORTADORA DE HILOS CNC PARA LA EMPRESA PLASTEX S.A.”, realizado por Ricardo Antonio Nicolalde Baquerizo, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, marzo de 2021.



Ing. Angel Eugenio Cárdenas Cadme

C.I. 0301631966

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Ricardo Antonio Nicolalde Baquerizo con documento de identificación N° 0150053791, autor del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UNA MÁQUINA CORTADORA DE HILOS CNC PARA LA EMPRESA PLASTEX S.A.”**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, marzo de 2021.



Ricardo Antonio Nicolalde Baquerizo
C.I. 0150053791

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por haberme bendecido a mi familia y a mí en todo momento, por haberme permitido llegar a este momento tan importante de mi formación profesional, a mis padres por haberme dado el apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida, no está de más decir que ellos lucharon junto a mí para que yo pueda cumplir esta meta, gran parte de mi esfuerzo lo dedico a ellos y aunque en esta época de pandemia no ha sido fácil hemos salido gracias a Dios adelante.

A mi tutor Ing. Eugenio Cárdenas que además de ser un profesor ha sido como un amigo y a mi cotutora Ing. Mónica Romero que me han ayudado en la realización de este Proyecto, agradezco también por sus gestos y compartir sus anhelos de cumplir mis metas.

Ricardo Antonio Nicolalde Baquerizo

RESUMEN

El presente proyecto contiene el diseño de una máquina cortadora de hilos CNC, Con el propósito de elaborar piezas de poliestireno de diferentes dimensiones y formas para la empresa Plastex S.A., la misma que busca mejorar los procesos de producción en la planta, ya que se mantiene la necesidad de implementación de prototipado, tomando en consideración los estándares de calidad requeridos en la fabricación de nuevos productos plásticos con el afán de satisfacer la demanda local. Se inicia con el estudio de producción de la empresa para determinar procesos tecnológicos que se han desarrollado en los últimos tiempos.

Una vez identificada la necesidad se analiza el Estado del arte de los sistemas de la máquina cortadora de hilos CNC, con la finalidad de obtener una investigación innovadora del tema en la actualidad, por último, la elaboración y validación de un diseño mecatrónico que pueda incorporar y combinar los diferentes sistemas de la ingeniería.

Palabras Clave: *CNC, Análisis, Cortadora, Poliestireno.*

ABSTRACT

This project contains the design of a CNC wire cutting machine, with the purpose of developing polystyrene pieces of different dimensions and shapes for the company Plastex S.A., that search to improve production processes in the plant, since it is required the implementation of prototyping, taking into account the quality standards required in the manufacture of new plastic products in order to satisfy local demand. It begins with the study of the company's production to determine technological processes that have been developed in recent times.

Once the need has been identified, the state of the art of the systems of the CNC thread cutting machine is analyzed, in order to obtain an innovative investigation of the subject at present in addition to creating a design that can meet the objectives.

Key Words: *CNC, Analysis, Cutter, Polystyrene.*

Índice

Contenido

Cesión de derechos de autor.....	II
Certificación.....	III
Declaratoria de responsabilidad.....	IV
Agradecimientos.....	V
Resumen.....	VI
Abstract.....	VII
Índice.....	VIII
Glosario.....	IX
Índice de Figuras.....	X
Índice de tablas.....	XI
1. Introducción.....	12
2. Problema de estudio.....	13
2.1 Antecedentes.....	13
2.2 Importancia y alcances.....	14
2.3 Delimitación.....	14
3. Objetivos	14
3.1 Objetivo general	14
3.2 Objetivo Específico	14
4. Fundamentos Teóricos	15
4.1 Máquina cortadora de Hilos CNC en el proceso de prototipado.....	15
4.2 Estado del arte de la Máquina cortadora de Hilos CNC.....	17
4.3 Máquinas cortadoras de hilos de última generación en el mercado.....	17
4.4 Cream.....	17
4.5 Infinity.....	17
4.6 Método y sistema de fabricación de moldes personalizados por medio de un brazo robótico.....	18
4.7 Corte robótico de cuchilla caliente.....	19
4.8 Corte de Hilo con la máquina P60.....	19
4.9 Cortadora de hilo multifuncional.....	20
4.10 Cortadora de hilos de Mw2 CNC.....	21
4.11 Cortadora de hilos de MW3 CNC.....	21
4.12 Funcionamiento de la máquina cortadora de hilos CNC.....	22
4.13 Estado de producción actual de la empresa	26

5. Marco Metodológico.....	28
5.1 Diseño Mecánico.....	28
5.2 Justificación de materiales.....	28
5.3 Estructura mecánica y selección de componentes.....	29
5.4 Componentes mecánicos	33
5.5 Selección de la banda dentada.....	33
5.6 Selección de los perfiles de Aluminio.....	33
5.7 Selección de los rodamientos.....	34
5.8 Componentes mecánicos.....	35
5.9 Modelado matemático.....	36
5.10 Sistema de control.....	40
5.11 Diseño de control del motor a pasos.....	40
5.12 Sistema Electrónico.....	43
5.13 Análisis de potencia del circuito eléctrico	44
5.14 Circuito de control para un motor bipolar.....	44
5.15 Tabla de componentes.....	46
5.16 Sistema de Control digital.....	47
5.17 Cálculo de traslación de la máquina.....	47
5.18 Control de bucle cerrado.....	48
6. Resultados	49
6.1 Validación del diseño mecánico	49
6.2 Análisis de velocidad.....	50
6.3 Circuito Esquemático.....	52
6.4 Validación Circuito Esquemático.....	55
6.5 Comprobación Circuito Esquemático.....	57
6.6 Interfaz de la máquina y el usuario (Scada).....	58
7. Análisis de costos.....	59
8. Conclusiones.....	62
9. Recomendaciones.....	62
10. Referencias Bibliográficas.....	63
11. Anexos.....	65

Glosario

- **Rebabas:** Porción de materia sobrante que sobresale en los bordes, las juntas o en la superficie de un recipiente. (Sons, 2017).
- **Mecanizar:** Es un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión. (Norton, 2013).
- **Poliestireno:** Es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del monómero de estireno. (Sons, 2017).
- **Estético:** De la estética o relacionado con esta doctrina filosófica. (Nisbett, 2008).
- **Polímero:** Sustancia química que resulta de un proceso de polimerización. (Sons, 2017).
- **Termoplástico:** Que se ablanda por la acción del calor y se endurece al enfriarse, de forma reversible. (Sons, 2017).
- **CNC:** El control numérico o control decimal numérico es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o palancas. (Mejía Sierra, 2013).
- **EPS:** Espumas de poliestireno extruido. (Sons, 2017).
- **Estado del arte:** Se hace referencia a la construcción de un análisis de tipo documental. Este muestra los avances más importantes que se han logrado con respecto al conocimiento de un tema. (Norton, 2013).
- **XPS:** Espumas de poliestireno expandidas. (Sons, 2017).

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de Termoconformado para la empresa Plastex S.A. (Salazar, 2020)....	14
Figura 2. Cortadora de hilos CNC de poliestireno expandido.....	16
Figura 3. Funcionamiento de la cortadora de hilos CNC.....	17
Figura 4. Cream. (Ferdinando, 2019).....	19
Figura 5. Infinity. (Ferdinando, 2019).....	19
Figura 6. Figure 3A.(United States of America Patente nº 62/029.612., 2016).....	20
Figure 7. Tri-robot hot-blade cutting configuration (Asbjørn Søndergaard, 2016).....	20
Figura 8. Selección de la banda de transmisión.....	21
Figura 9. Selección del perfil de aluminio.....	21
Figura 10. Velocidades límites de acuerdo con el concepto SNR (international, 2009)..	22
Figura 11. Diseño de la cortadora CNC, incorporación de los grados de libertad.....	23
Figura 12. Análisis de fuerzas internas en el mecanismo de las columnas.....	24
Figura 13. Centro de gravedad de la columna lateral.....	25
Figura 14. Simulación en Ansys Análisis estructural.....	26
Figura 15. Simulación esfuerzo equivalente.....	27
Figura 16. Simulación movimiento dinámica de la máquina CNC.....	27
Figura 17. Dinámica de las columnas laterales.....	28
Figura 18. Simulación del comportamiento de la respuesta del sistema.....	29
Figura 19. Diagrama jerárquico de comunicación entre el ordenador y la máquina.....	31
Figura 20. One phase of a transistor bridge bipolar drive circuit.....	31
Figura 21. Simulación de comportamiento de la corriente.....	32
Figura 22. Circuito Esquemático.....	33
Figura 23. Simulación en proteus del circuito electrónico.....	34

Índice de tablas

Tabla 1. Presentación de formatos de las cajas térmicas. (Plastex-S.A., 2006).....	17
Tabla 2. Presentación de formatos de las esferas. (Plastex-S.A., 2006).....	18
Tabla 3. Presentación de formatos de las Circunferencias. (Plastex-S.A., 2006).....	18
Tabla 4. Listados de componentes mecánicos.....	22
Tabla 5. Determinación de su centro de gravedad.....	24
Tabla 6. Información de los elementos mecánicos.....	24
Tabla 7. Componentes y Equipos Electrónicos.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso de la producción mediante el proceso de inyección del poliestireno expandido en la empresa Plastex S.A. se incorpora un nuevo proceso de prototipado, al integrar una máquina cortadora de hilos CNC, que consiste en la creación de nuevos modelos, los cuales pueden ser útiles para la representación, demostración o simulación en un transcurso de planificación cómodamente ampliable y modificable.

El contenido de este documento presenta diferentes enfoques metodológicos para establecer un conjunto de temáticas que son las herramientas del investigador para obtención de datos e información dentro del campo de la Ingeniería, Este documento detalla con el inicio del estudio de los procesos de manufactura actuales en la empresa Plastex S.A. para encontrar los procedimientos industriales de fabricación del producto para establecer la necesidad de la incorporación de la máquina en el sistema de producción y satisfacer los objetivos planteados.

Una vez que se realiza el estudio estado actual de los procesos industriales dentro de la empresa, se ejecuta un análisis integral del estado del arte de las máquinas cortadoras de hilos CNC detallando el impacto global en mundo industrial, indagando la descripción de datos para establecer relaciones de nuevas investigaciones y formaciones en la génesis de un desarrollo innovador aplicando una simple técnica metodológica, a partir de la elaboración de este estudio con un grado de compromiso de innovación de la fabricación de nuevos productos se realiza con la presentación según al diseño específico de los sistemas incorporados en la rama de la ingeniería mecatrónica integrando en las diferentes áreas como la mecánica, electrónica y el control teniendo interacción compacta en el desarrollo de dicho proyecto.

Todo el estudio que es incorporado en el diseño se sostendrá con la reproducción y comprobación de los resultados consolidada en la ejecución de un programa de ordenador basada en la simulación de los comportamientos físicos, donde se adquiere la recolección, el análisis y la sistematización de datos en cada uno de los sistemas agregados al diseño mecatrónico, que trasciende al planteamiento de una hipótesis de afirmaciones en los resultados del estudio incorporando limitaciones y tendencias acercándose a un comportamiento real.

2. PROBLEMA DE ESTUDIO

a. Antecedentes

Plastex S.A. es una empresa situada en la provincia del Azuay, la misma fue puesta en marcha hace más de 5 años dedica a la producción de diferentes modelos de poliestireno expandido como cajas térmicas, coolers, esferas, circunferencias y troquelados, planchas, piezas moldeadas, bloques, etc.

El proceso de elaboración de este tipo de productos en la empresa Plastex S.A. comienza con la obtención de la materia prima poliestireno cristal o poliestireno de uso general y el vapor de agua obtenida en el caldero a la máquina de preexpansora, donde se realiza la transformación del cristal a poliestireno expandido en el transcurso de preexpansión del material, después pasa por el proceso de inyección para la obtención de la piezas y la distribución, como se aprecia en la figura 1.

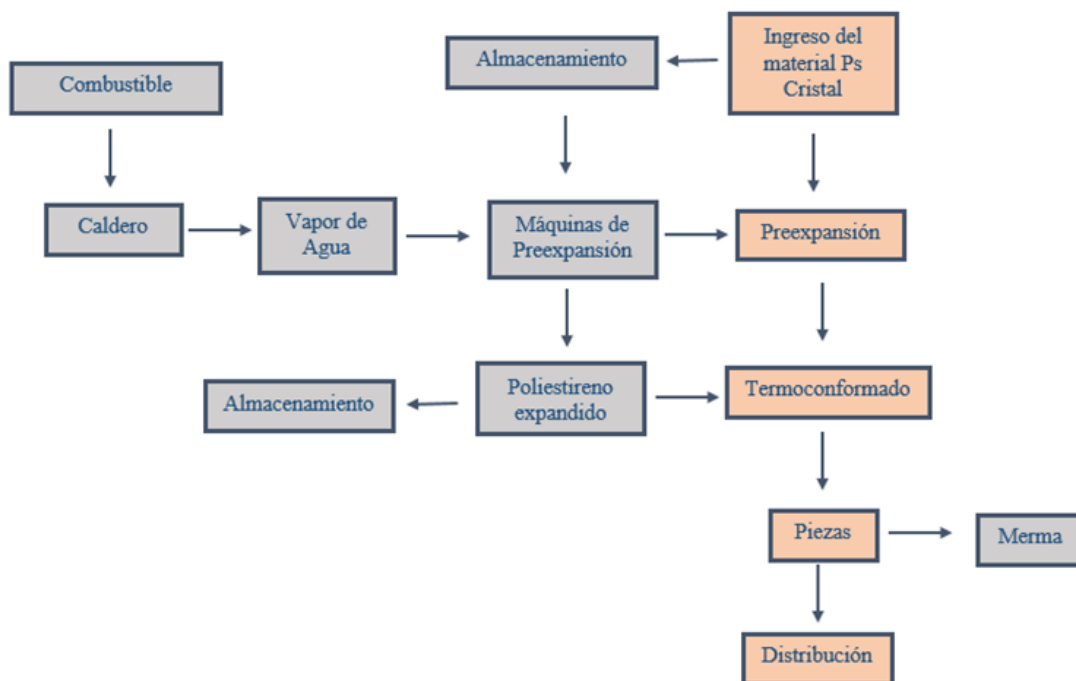


Figura 1. Proceso de Termoconformado para la empresa Plastex S.A (Fuente, autor).

En el mercado de la ciudad de Cuenca, existe una gran demanda de piezas y productos de poliestireno, de la cual la empresa Plastex S.A. manufactura empleando el proceso inyección de poliestireno expandido, para ello emplea diferentes moldes de aluminio que están a su disposición. El problema detectado es la falta de una máquina de prototipado rápido, previo a la elaboración de diferentes tipos de piezas. Al existir una máquina cortadora de hilos CNC se podrá mecanizar piezas de poliestireno, realizando un corte limpio y preciso de contornos en diferentes formas.

b. Importancia y alcances

En el presente proyecto describe el diseño de una cortadora de hilos CNC, que consiste en cortar el material poliestireno en objetos prismáticos con la finalidad de elaborar piezas de diferentes dimensiones y formas para la empresa Plastex S.A., la misma que busca mejorar los procesos de producción en la planta, por lo tanto se requiere la implementación de prototipado, tomando en consideración los estándares de calidad requeridos en la fabricación de nuevos productos plásticos con el afán de satisfacer la demanda local.

Al adquirir esta máquina cortadora CNC, permite la obtención de piezas de una manera eficaz y eficiente que un corte manual, generando importancia al prototipado como proceso clave para materializar la propuesta de valor y la interacción, hasta llegar a una versión final optimizada, este proceso incorporado es iterativo y evoluciona desde las primeras propuestas lejanas del diseño final, hasta obtener la alta fidelidad, que definen las características que deberán tener el producto cuando sea utilizado por los usuarios.

c. Delimitación

El desarrollo de este proyecto será implementado después de que tenga la aprobación Gerencial de la empresa Plastex S.A. en la ciudad de Cuenca, una vez establecida la aprobación se enviará una solicitud requiriendo los recursos necesarios para ejecución del proyecto.

3. Objetivos

a. Objetivo general

- Diseñar una máquina cortadora de hilos CNC, para el mecanizado de piezas de poliestireno expandido para la empresa Plastex S.A.

b. Objetivo Específico

- Investigar el estado del arte de sistemas de corte por hilo CNC.
- Diseñar el sistema mecánico, electrónico y de control para la construcción de una cortadora CNC de poliestireno expandido.
- Validar cada uno de los diseños, empleando simuladores adecuados para los prototipos planteados.
- Analizar los costos para la implementación de prototipado CNC.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los polímeros, debido a sus excepcionales propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, se utilizan ampliamente como materiales de ingeniería, especialmente para la aplicación de los productos como: la conservación de alimentos, aislantes térmicos, materiales de protección, etc.(Sons, 2017).

a. Máquina cortadora de hilos CNC en el proceso de prototipado

En el uso de la tecnología moderna, la cortadora de hilo CNC, permite la obtención de piezas de una manera eficaz y eficiente que un corte manual, el cual demuestra la importancia al prototipado como proceso clave para materializar la propuesta de valor y la interacción, hasta llegar a una versión final optimizada. El proceso de prototipado es iterativo y evoluciona desde las primeras propuestas lejanas del diseño final, hasta obtener la alta fidelidad, que definen las características que deberán tener el producto cuando sea utilizado por los usuarios. (Mejía Sierra, 2013). En la figura 1 presenta un esquema representativo tridimensional de una cortadora CNC que se emplea en los campos anteriormente descritos para fabricación de las piezas de poliestireno.

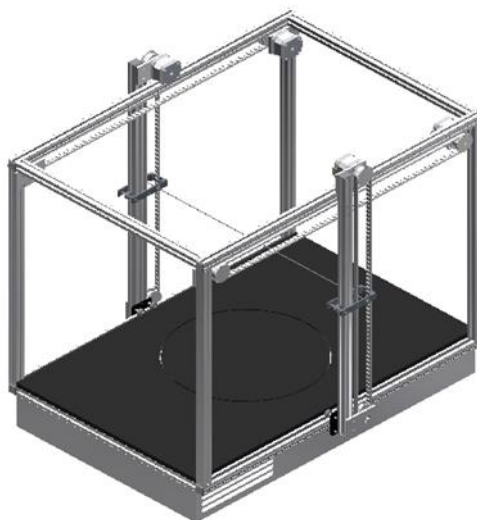


Figura 2. Cortadora de hilos CNC de poliestireno expandido (Fuente, autor)

La cortadora de hilos CNC que se representa esquemáticamente en la figura 2, es una máquina controlada por un ordenador, capaz de cortar cualquier objeto con geometrías prismáticas, a partir del material de poliestireno extruido y expandidas (EPS y XPS). El mecanizado del material se realiza con un alambre caliente, con el objetivo de cortar en secciones, los movimientos verticales y horizontales del hilo están sujetos a unas columnas laterales que sujetan en hilo, y se desplazan mediante la tracción de unos motores de paso, controlados por un sistema de control electrónico conectado al ordenador y supervisado por un software exclusivo de comandos de posición del corte. Esto garantiza una precisión impecable, de alta velocidad de procesamiento y una calidad excelente de funcionamiento. (Smith, 2006).

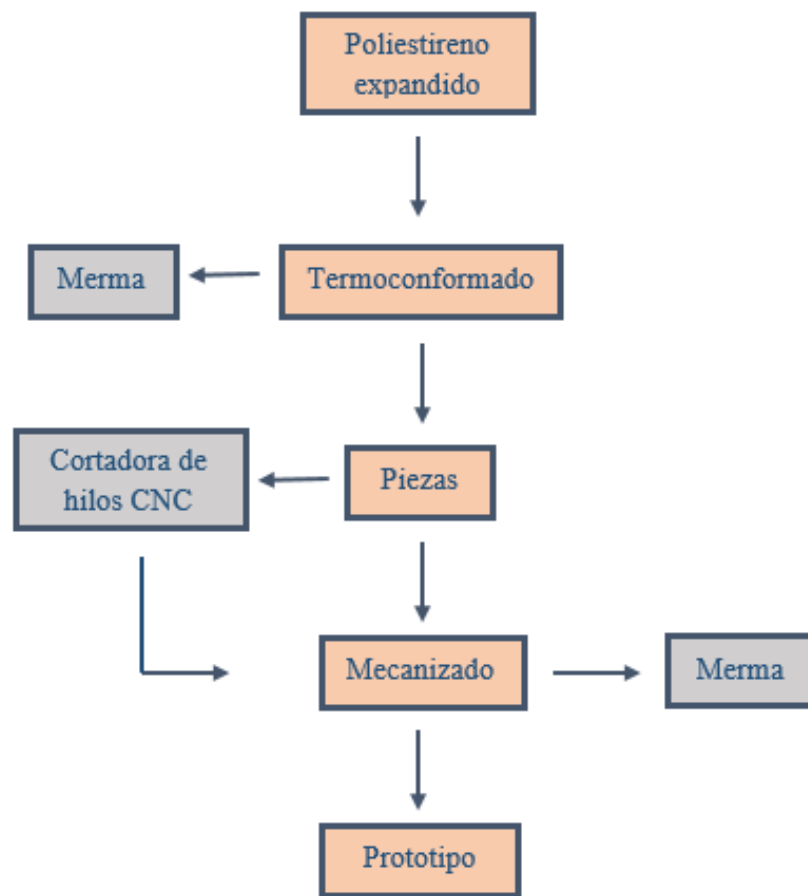


Figura 3. Incorporación de la Cortadora de hilos CNC de poliestireno expandido en la empresa. (Fuente, autor).

b. Estado del arte de la Máquina cortadora de hilos CNC

El estado del arte se centra en una estrategia metodológica de enfoque histórico e innovador, este documento describe la historia de cómo cada máquina CNC fue mejorando al incorporar nueva tecnología como: nuevos efectores o cambiando el diseño de acuerdo a las necesidades del usuario.

c. Máquinas cortadoras de hilos de última generación en el mercado

En los últimos años, la máquina cortadora CNC a ofrecido diferentes soluciones de mecanizado, con la creciente demanda de productos de poliestireno, los fabricantes de este tipo de maquinaria han optimizado el rendimiento, mejora de calidad e innovación de la máquina para maximizar sus márgenes de producción.

d. Cream (2006)

Cream es una máquina parecida a la mayoría de las cortadoras CNC, Se establece como una cortadora de dos dimensiones (2D), posee un sistema de control remoto para mayor facilidad de manejo, es excelente para usuarios inexpertos en el campo de manejo de una CAD/CAM. (Ferdinando, 2019).



Figura 4. Cream. (Ferdinando, 2019).

e. Infinity

Infinity es una máquina con la última innovación dentro de las cortadoras de hilos CNC, ya incorpora 4 ejes independientes a los que se puede adicionar: un torno horizontal o vertical, un multihilo y excavadora, para crear todo tipo de objetos simétricos, asimétricos, esferas, esculturas, columnas y objetos de tercera dimensión (3D), que tiende a un corte de manera extremadamente precisa y limpia, incluso en trabajos complicados como las columnas de trenzado, permite la máxima libertad en el diseño creativo. (Ferdinando, 2019).



Figura 5. Infinity. (Ferdinando, 2019)

f. Método y sistema de fabricación de moldes personalizados por medio de un brazo robótico

Otro método de mecanizado de poliestireno expandido es el corte tridimensional a partir de un bloque de poliestireno, por medio de un brazo robótico, que corta el material en forma secuencial para darle perfil al modelo de tercera dimensión (3D), mediante el uso de un efector final incorporado en el último eslabón del brazo robótico. (BERMAN, 2016).

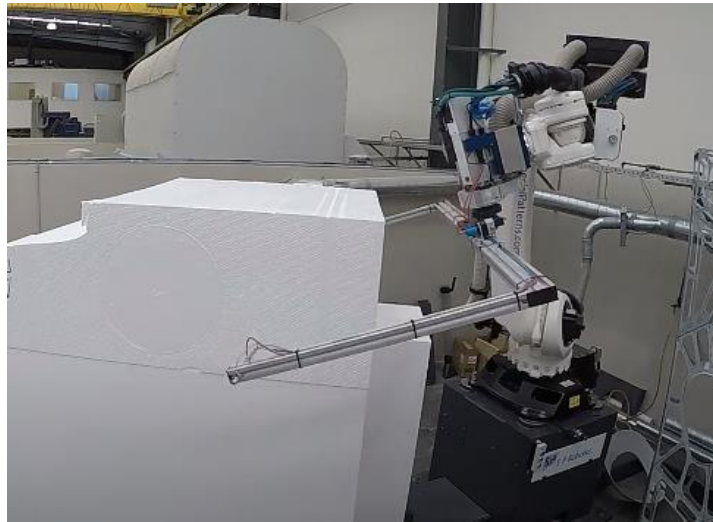


Figura 6. Figure 3A. (BERMAN, 2016).

Este sistema es controlado por un ordenador, comprende de una mesa de soporte su movimiento es de rotación y traslación con relación a dicha base del robot, el efector final se encuentra acoplado en el extremo distal del brazo robótico, realizando una multitarea en el movimiento espacial y recortando secuencialmente en capas al material dando forma y dimensión predeterminada, el efector se compone de un alambre caliente energizada por corriente que derrite el material en una pequeña sección lineal. (BERMAN, 2016).

g. Corte robótico de cuchilla caliente

La mayoría de diseños estructurales están restringidos por superficies planas y curvas, el siguiente método consiste de dos o tres brazos robóticos que tiene la capacidad de fabricar piezas de superficies curvas, depende de la distancia y la rotación de los brazos robóticos para crear recortes en una trayectoria curva, dando la forma esperada al prototipo, estas curvas se aproximan al software CAD en el diseño del movimiento de curvatura elástica, al obtener este tipo de corte se muestra que la superficie es mucho más suave que un corte dividido en capas. (Asbjørn Søndergaard, 2016).



Figure 7. Configuración de corte con hoja caliente de tres robots (Asbjørn Søndergaard, 2016)

h. Corte de hilo con la máquina P60

La máquina P60 está diseñada para cortes verticales y horizontales, su movimiento está restringido en curvaturas planas de dos dimensiones (2D), es utilizado especialmente para el diseño de letreros o cortes de plantillas rectangulares, tiene mayor facilidad de uso de corte ya que no requiere de un modelo de tres dimensiones.



Figura 8. Máquina P60. (ltd, 2006).

i. Cortadora de hilo multifuncional con torno CNC

La cortadora multifuncional CNC a diferencia de la cortadora CNC su plataforma circular se encuentra en sentido horizontal, adquiere un corte a lo largo de su eje central que da un movimiento de rotación, similar al funcionamiento de un torno CNC, las aplicaciones que posee es el crear perfiles cilíndricos que puedan ser incorporados en diseños de mayor escala como en estructuras arquitectónicas o adornos decorativos. (ltd, 2006).



Figura 9. Cortadora de hilo multifuncional (ltd, 2006)

j. Cortadora de hilos de MW2 CNC

La cortadora de hilos MW2 está equipada para el corte de un bloque de materia prima en varias láminas, ya que dispone de un efector que puede incorporar una serie de hilos cortantes a lo largo de los perfiles laterales de la máquina, dependiendo de la distancia de los hilos se obtiene el espesor de la lámina, a diferencia de las otras cortadoras CNC, en esta máquina se pierde un grado de libertad movimiento traslación vertical (ltd, 2006).



Figura 10. Cortadora de hilos de MW2 CNC (ltd, 2006)

k. Cortadora de hilos de MW3 CNC

A diferencia de la cortadora de hilos CNC MW2, la cortadora de hilos MW3 contiene un segundo grado de libertad que permite la rotación de la pieza en el sentido vertical como se muestra en la figura 11, este segundo grado de libertad se utiliza para el diseño de estructuras hexagonales que puedan cortarse en diferentes laminas. (ltd, 2006).



Figura 11. Cortadora de hilos de MW3 CNC (ltd, 2006)

1. Funcionamiento de la máquina cortadora de hilos CNC

Para el funcionamiento de la máquina cortadora de hilos el usuario deberá ingresar el lenguaje de máquina (código G) dentro de un ordenador, el ordenador procesará el código y transferirá los datos a un circuito electrónico para ceder la potencia y el control a los motores que dan movimiento al prototipo, como se aprecia en la figura 12 en el cual se presenta un esquema de funcionamiento de una cortadora de hilos CNC.

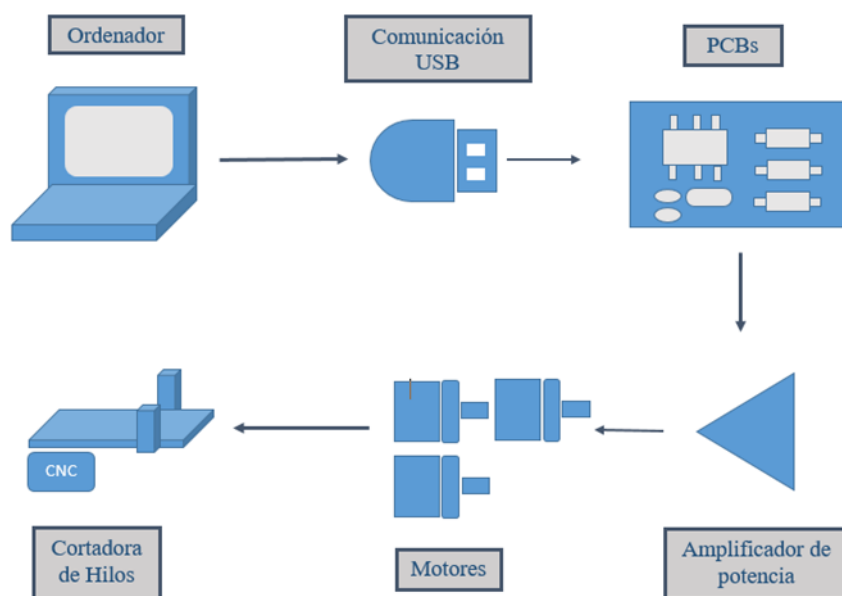


Figura 12. Funcionamiento de la cortadora de hilos CNC. (Fuente, autor)

La importancia en el diseño de este tipo de máquinas es el control de movimiento de alta velocidad y elevada precisión, ya que el acabado superficial depende de las trayectorias de velocidad en la que corta el hilo hacia la materia prima dando la respectiva forma, por lo tanto el control de operación del programa debe responder de una manera eficiente para el modelamiento del perfil, por lo general el arranque de los motores en su comportamiento no es inmediato y sigue una trayectoria de velocidad trapezoidal,

dependiendo de las aceleraciones suaves, el control del motor puede manipularse la posición del rotor con una mayor precisión, dependiendo de la frecuencia de modulación del pulso (PWM) se aumenta o disminuye la velocidad angular del rotor. (GUROCAK, 2016).

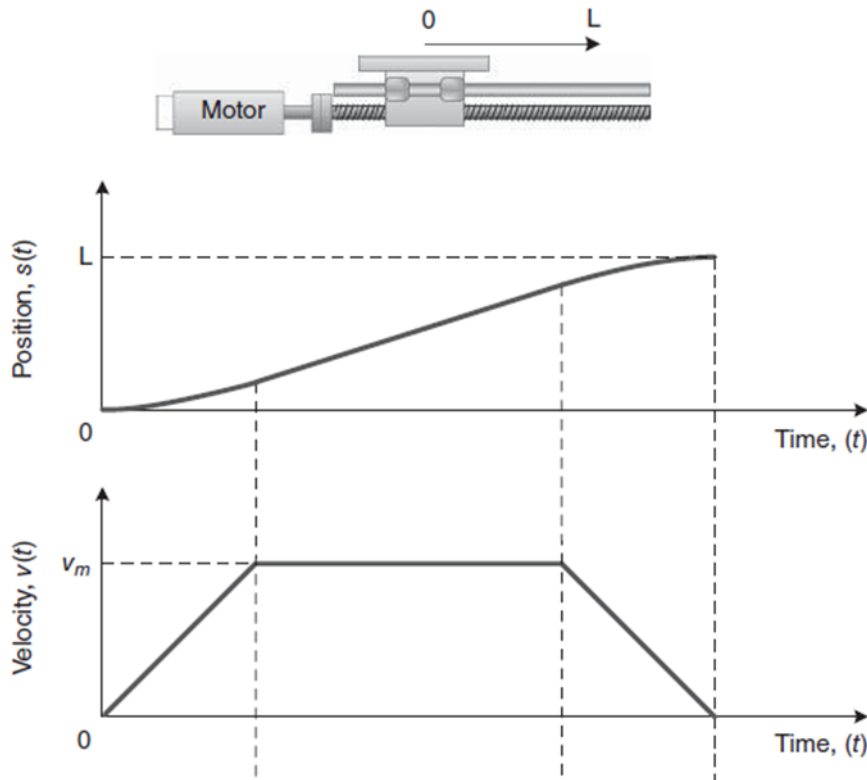


Figura 13. El perfil de velocidad trapezoidal y la aceleración de posición asociada y los perfiles de tirón mueven un eje de 0 a la posición 1 (GUROCAK, 2016)

En el uso de accionamiento para el movimiento del efector en la máquina se impone la utilización de motores a pasos híbridos, de tipo bipolar de 4 fases, como el que se representa en la figura 14, que tiene mayor precisión en el desplazamiento y posicionamiento angular, por lo general estos motores se activan por medio de una señal de modulación de pulsos como el PWM en las cuatro fases del estator, la elección se condujo a que al comparar con el motor de pasos unipolar este motor tiene mayor torque y mayor precisión que los motores de corriente directa. (KENJO, 1984).

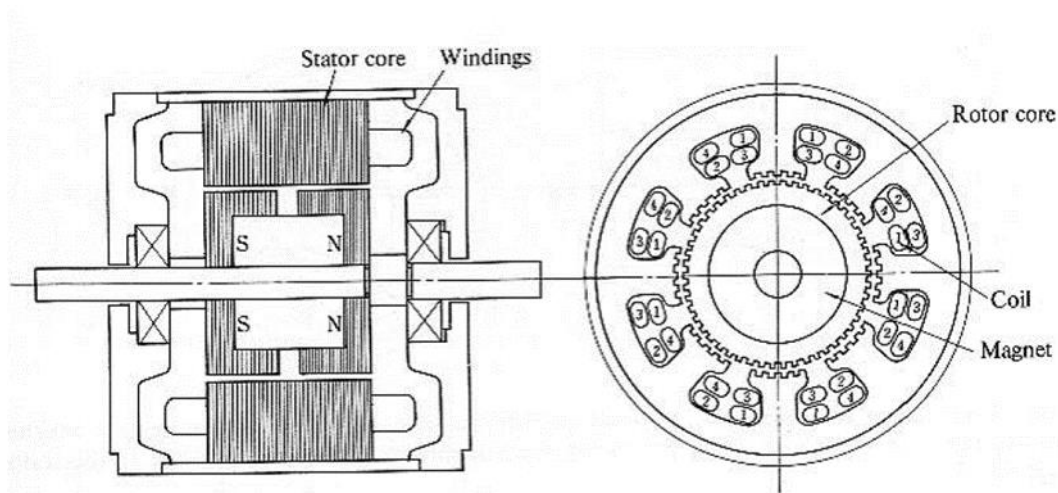


Figura 14. Construcción de motor híbrido. (KENJO, 1984).

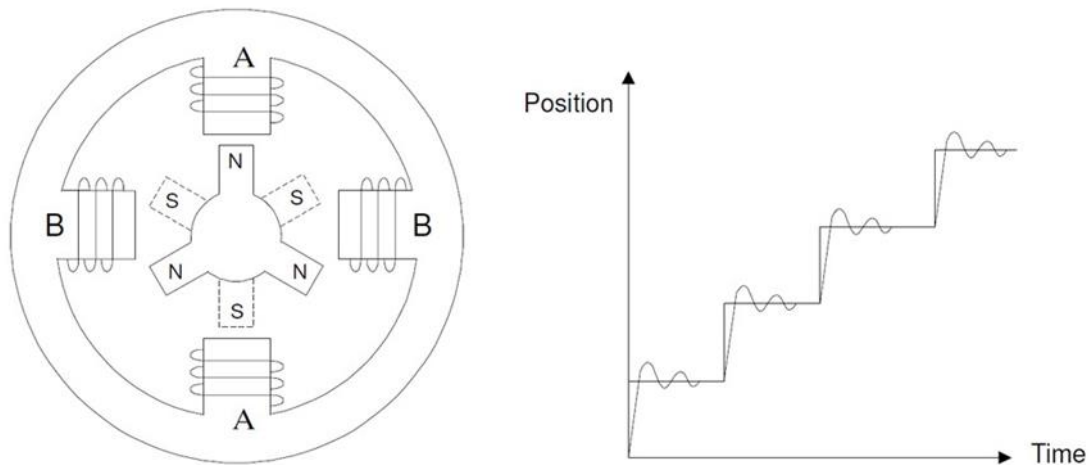


Figura 15. Ángulo de rotor y serie de pulsos para caso de baja frecuencia. (KENJO, 1984).

En la figura 15 se proyecta el comportamiento de la velocidad del motor al ser activado por una señal de PWM, que depende de la frecuencia la señal, se muestra unos escalonamientos que siguen una trayectoria de una rampa que da inicio de una señal trapezoidal, los escalones no son simétricamente iguales a un escalón rectilíneo, ya que contiene pequeñas oscilaciones en el intervalo de frecuencia, dependiendo de la respuesta son pequeñas señales de entrada subamortiguado, que definen el estado de estabilidad del comportamiento del motor a pasos. (KENJO, 1984).

En cada polo se encuentra un bobinado que es alimentado por una fuente externa de voltaje según la polaridad del cada una de estas bobinas se produce un campo magnético norte o sur, el rotor está compuesto de un núcleo de acero ferromagnético que contiene un número de dientes, que se encuentra magnetizados según la polaridad del material, según el contacto de la bobina como el diente puede producirse una atracción o una repulsión entre los dos. (Allan H. Robbins, 2006).

La conexión del motor a la fuente de alimentación controlada por el circuito potencia en función a los pulsos que envía el microcontrolador y la activación del motor bipolar en el ajuste del sentido de giro del rotor, se muestra que el motor bipolar está construido por dos bobinados que se encuentran en el estator del motor (MONK, 2003).

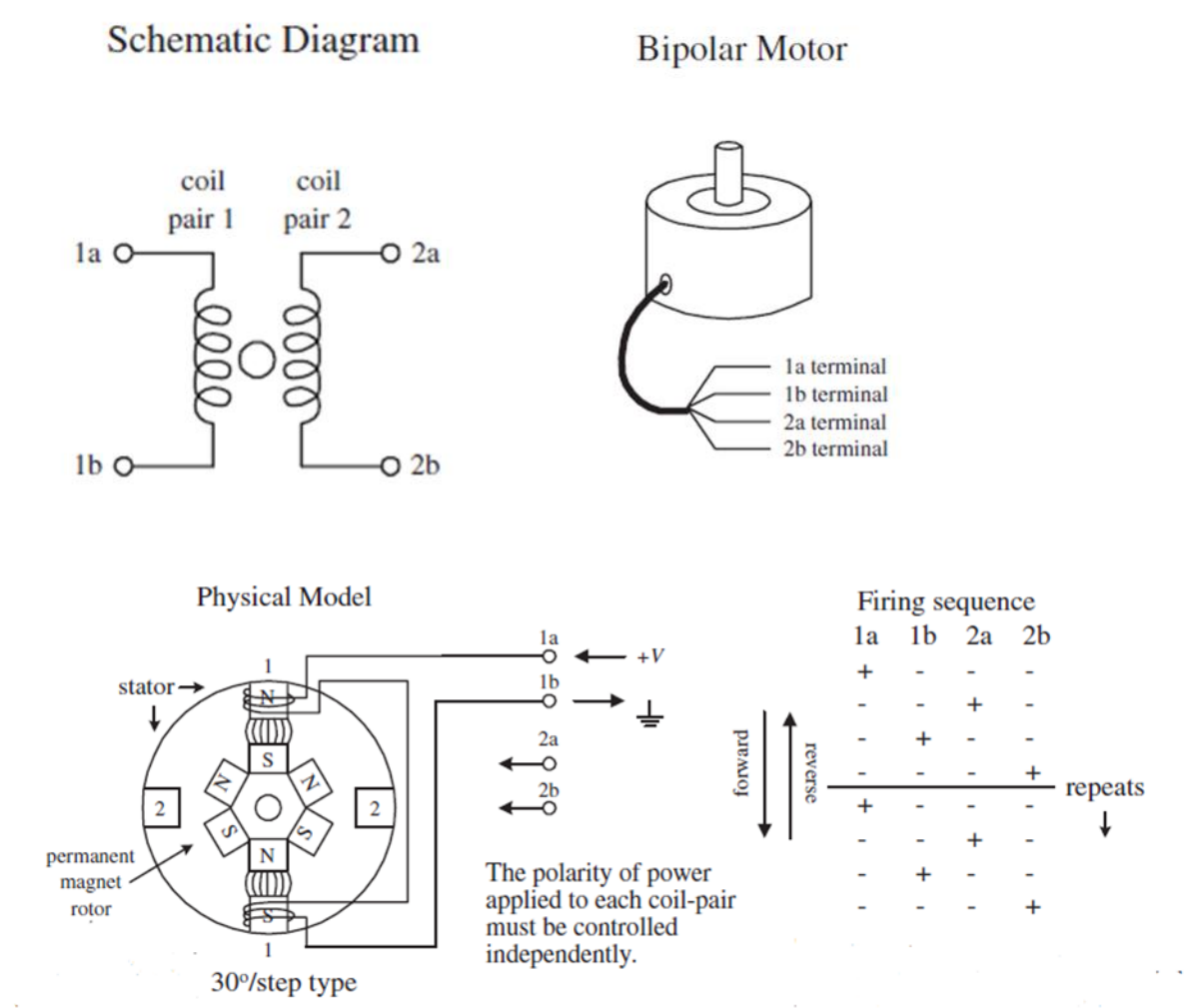


Figura 16. Funcionamiento del motor a pasos (MONK, 2003).

En la figura 16 se presenta el funcionamiento y la construcción interna del motor a pasos, en el diagrama esquemático observamos que está compuesto por dos bobinas que se encuentran en el estator cada uno de estas bobinas, el motor tiene 4 entradas, cada entrada es conectada a las dos bobinas estas entradas se llaman fases del motor, si a la entrada de la bobina se encuentra alimentada por un voltaje de una fuente de alimentación la bobina 1b debe estar conectada a tierra para que la corriente pase por la bobina y se produzca un campo magnético, este campo magnético ejerce una fuerza magnetomotriz que ayuda que el rotor del motor gire en sentido horario. (MONK, 2003).

Si se establece una secuencia de alimentación en cada fase, como se observa en la figura, que el signo “+” es la conmutación de la fuente a la fase y el signo “-” es la conexión a tierra, siguiendo la secuencia superior la secuencia de activación el motor gira en sentido de las manecillas del reloj, en cambio siguiendo la secuencia inferior el rotor gira al contrario de las manecillas del reloj. (Allan H. Robbins, 2006).

m. Estado de producción actual de la empresa

Al establecer el poliestireno expandido como un material que se adapta a cualquier forma, es posible fabricar una infinidad de piezas que se adapten a la forma del molde, la empresa Plastex produce los siguientes productos que están a la venta como:

- **Cajas térmicas:** Contiene la mejor alternativa empaques de alimentos o productos que requieren refrigeración para su conservación, las presentaciones que plantea la empresa Plastex S.A. tiene los siguientes formatos que muestra en la siguiente tabla.

Formato	Dimensiones (mm)	Capacidad (L)	Peso (g)
ISO 4	280 x 210 x 116	3.5	71
ISO 8	400 x 290 x 135	7	136
ISO 10	400 x 314 x 162	10	216
Nevera 9	270 x 240 x 230	9.7	167
Nevera 18	365 x 275 x 285	17.6	217

Tabla 1. Presentación de formatos de las cajas térmicas. (Plastex-S.A., 2006)

- **Coolers:** Que se utilizan para el almacenamiento y transporte de alimentos domésticos, que necesitan conservar su temperatura, las presentaciones de este tipo de productos tiene la dimensión de 38 x 28 x 29 cm.
- **Bloques:** Son ideales para operaciones de aligeramiento en obras, su presentación viene en una dimensión estándar 408 x 126 x 101 cm.
- **Esferas:** Son utilizadas en diferentes trabajos de manualidades, para su presentación se muestra en la siguiente el formato de la venta del producto, que exhibe en una tabla el tamaño del producto y la venta de la cantidad del producto.

Diámetro (cm)	Unidades por bulto
2	1000
3	2000
4	1500
5	750
6	500
7	300
8	200
10	100
12	60
14	40

Tabla 2. Presentación de formatos de las esferas. (Plastex-S.A., 2006).

- **Circunferencias:** Al igual que las esferas son utilizadas para diferentes tipos de manualidades en la siguiente tabla muestra formato de venta de este producto.

Diámetro (cm)	Unidades por bulto
8	50 o 100
10	50 o 100
12	50 o 100
15	50 o 100
20	50 o 100
25	50 o 100
30	50 o 100
35	50 o 100
40	50 o 100
45	50 o 100
50	50 o 100
55	50 o 100
60	50 o 100

Tabla 3. Presentación de formatos de las Circunferencias. (Plastex-S.A., 2006).

- **Piezas moldeadas:** Este tipo de piezas son utilizadas en las industrias para la protección de circuitos electrónicos en los equipos electrodomésticos, se puede evitar grandes impactos, vibraciones y variaciones térmicas bruscas, su presentación depende del diseño de la pieza proyectada a ser conservada.
- **Vinculación con otras empresas:** La empresa Plastex S.A. tiene sus clientes asegurados por la gran calidad sus de productos, además de responder la necesidad y la expectativa cambiante de los mismos.
- **Instalación de la máquina cortadora de hilos CNC:** Al crear diferentes tipos de modelos para piezas de embalaje o internas se requiere de un proceso de prototipo para simular o referenciar los productos.

5. MARCO METODOLÓGICO

El diseño mecatrónico de la máquina cortadora de hilos CNC debe estar ligado a los principios, teoremas y leyes de las diferentes áreas que están integradas en la Ingeniería Mecatrónica, el uso de diferentes instrumentos electrónicos y mecánicos y el dominio de la integración de software y hardware hacen posible la medición de variables en el prototipo. (Shetty, 2018).

a. Diseño Mecánico

El diseño de esta máquina, se inició con la aplicación de un método deductivo que entra en énfasis con el análisis matemático de elementos estructurales y componentes mecánicos, tomando en cuenta: los diferentes tipos de normas y códigos, dimensiones y tolerancias, factor de diseño y seguridad, para determinar la potencia necesaria de los motores que dan movilidad a la máquina. (Nisbett, 2008).

Para validar el análisis matemático se requiere de un software de simulación CAD/CAM donde tiene las herramientas necesarias que determinan el funcionamiento virtual de la máquina a través de diferentes entornos aplicados. (Norton, 2013)

b. Justificación del material

Las características del tipo de manufactura de la máquina dependen del tipo de material en el que se va a construir, por lo tanto, para reducir costo en la manufactura y mano de obra se propuso la comprar piezas prefabricadas que están disponibles en el mercado, con las dimensiones adecuadas a la instalación mecánica de la máquina.

Se determina que la estructura que va a soportar los motores y las guías lineales, fuesen de un material liviano pero resistente a los impactos como: el aluminio, el ABS y entre algunos materiales adecuados al diseño, ya que ayuda al usuario movilizar la máquina en varios lugares de la empresa además estar adecuado a la facilidad de operación.

En el anexo A, se describen el tipo de material que está conformado cada una de las piezas, su ensamblaje y su funcionamiento, hay que tomar en cuenta que algunos utensilios mecánicos ya están en la venta en el mercado, no se requieren de volver a fabricarlos o manufacturarlos.

c. Estructura mecánica y selección de componentes

El diseño completo de la cortadora CNC se muestra en la figura 17, su diseño se basa al de una vitrina cerrada, donde se expone el prototipo del producto que se requiere fabricar, con la intención de que el usuario pueda observar el mecanizado del material y logre responder a cualquier tipo de falla que se pueda presentar y consiguiendo una mayor seguridad.

La estructura es compacta al ser diseñado de forma cubica cerrada, el material que se sugiere para la construcción de las columnas de la máquina es el aluminio, cada columna viene prefabricada en perfiles cuadráticos, donde se dispone la dimensión y el precio en el mercado.

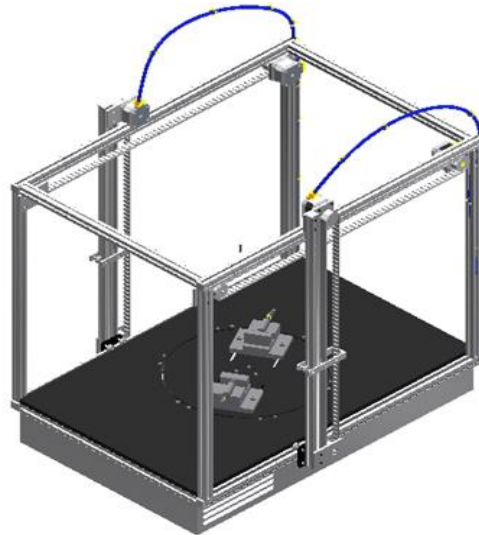


Figura 17. Diseño mecánico completo de la cortadora CNC

El hilo tendrá que ser un material térmico que permita mecanizar la materia prima, la forma del prototipo dependerá del movimiento del hilo, para sujetar el hilo se requiere de un mecanismo que pueda soportar las altas temperaturas del material y se permita trasladar sin tener dificultades a la hora del mecanizado, para esto se impuso el diseño de un mecanismo que se muestra en la figura 18, donde este documento lo nombrará en varias ocasiones como guía lineal.

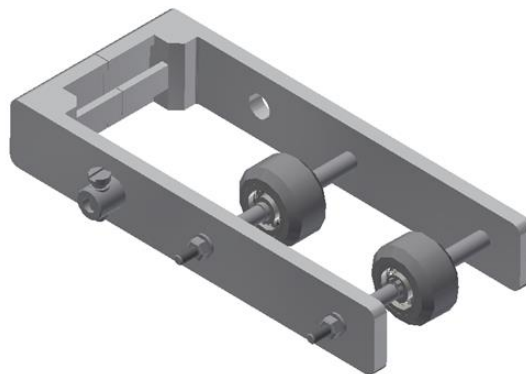


Figura 18. Guía lineal, (Fuente, autor).

La guía lineal se basa de un conjunto de piezas que permiten la movilidad y sujeción del hilo caliente, como se observa en la figura 18 posee de dos piezas laterales que están diseñadas para sujetar el hilo y la correa mecánica, la correa va ser el medio de transmisión mecánica que pueda dar movimiento lineal al hilo, además de estar sujeto a dos ruedas le permiten ajustarse al perfil de aluminio, como se observa en la figura 19, se muestra como la guía lineal está sujeta al perfil de aluminio y a la correa mecánica.

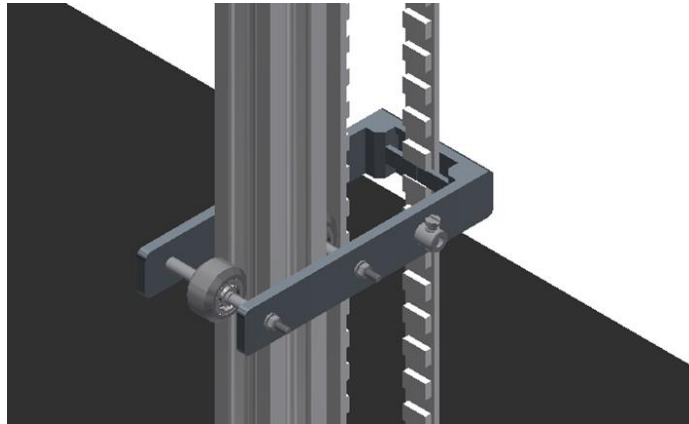


Figura 19. Acoplamiento de la Guía lineal a la correa y a la columna lateral, (Fuente, autor).

El perfil que va sujeto a la guía lineal también fue nombrado en este documento como columna lateral para mayor entendimiento del lector, la columna lateral no solo está sujeto a la guía lineal, sino que también se adhiere a un motor en la parte superior como se muestra la figura 20, y aun carro en la parte inferior que sirve como guía de movimiento de la columna lateral.

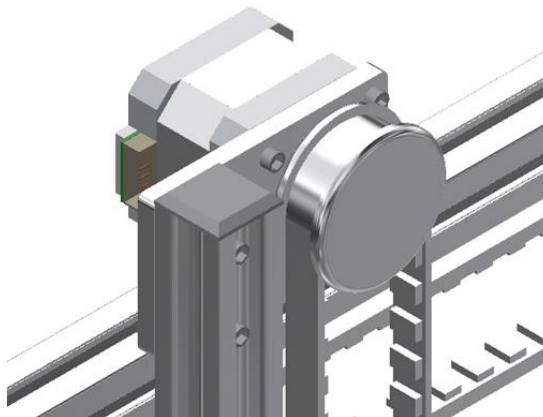


Figura 20. Acoplamiento de la correa en el motor a pasos, (Fuente, autor).

En la figura 20 se observa que la columna lateral esta acoplada a una placa de aluminio que sujeta el motor a pasos, este a su vez contiene una polea dentada que permite el movimiento de la correa a lo largo del perfil de aluminio, esta polea dentada puede estar diseñada de un material liviano como el plástico (ABS).

En la parte inferior de la columna lateral como ya hemos mencionado se encuentra acoplado un carro que sirve como guía para el movimiento de la columna lateral en sentido horizontal, permitiendo el traslado del hilo en el mismo sentido, además de acoplarse en el carro está sujeto otra placa de aluminio que permite sostener a una polea dentada para la sujeción completa de la correa como se muestra en la figura 21.

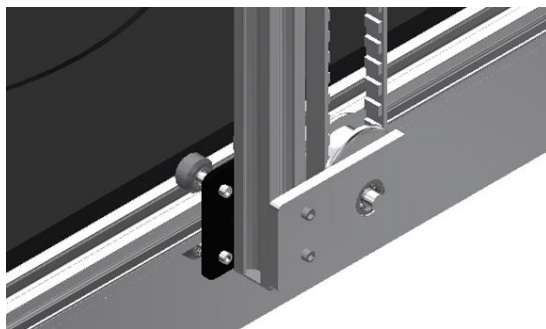


Figura 21. Acoplamiento del carro lineal. (Fuente, autor).

En la figura 22 muestra el carro que está conformado por el acoplamiento de cuatro ruedas que le permiten sujetar el perfil como se muestra en la figura 21, estas ruedas están diseñadas de tal forma que puedan acoplarse al perfil de aluminio que se muestra en la figura 21, el carro soporta el peso de toda la columna lateral, el motor, la guía lineal, las poleas y la correa mecánica, más adelante se hace conocer el análisis mecánico de las fuerzas que actúan en el sistema.

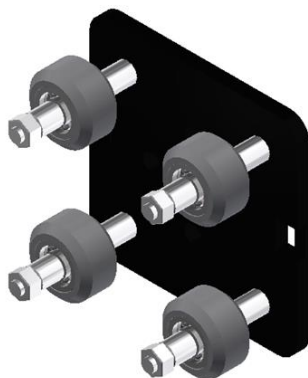


Figura 22. Carro lineal (Fuente, autor).

Las ruedas de ABS están acopladas a los rodamientos de esferas, que permiten una mayor facilidad de desplazamiento, y cada una de estas van sujetas a un eje de aluminio, al igual que la descripción de la primera columna lateral, se describe la columna complementaria ya que son idénticas.

En la parte inferior se observa que la plataforma de color negro está sujeta a la estructura metálica de la máquina como se observa en la figura 17, esta plataforma está diseñada para ser de un material liviano pero resistente como: la madera, donde se posa la materia prima que va ser mecanizada, bajo de esta plataforma se encuentra una caja metálica que puede ser fabricada por un proceso de conformado, esta caja metálica consiste de la sujeción de la tarjeta y de la fuente de voltaje del sistema eléctrico.

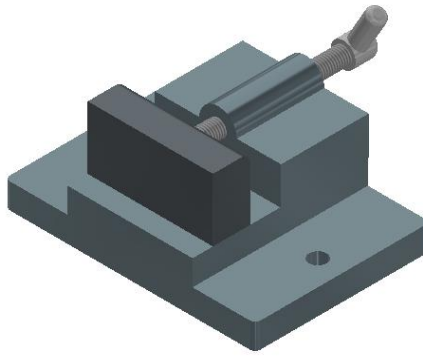


Figura 22. Entenalla de sujeción, (Fuente, autor).

La pieza será sujeta por dos entenallas como se observa en la figura 23, donde se montan en la plataforma de la máquina, la presión es ejercida por un tornillo sin fin que sostiene la pieza para que no se mueva como se muestra en la figura 22.

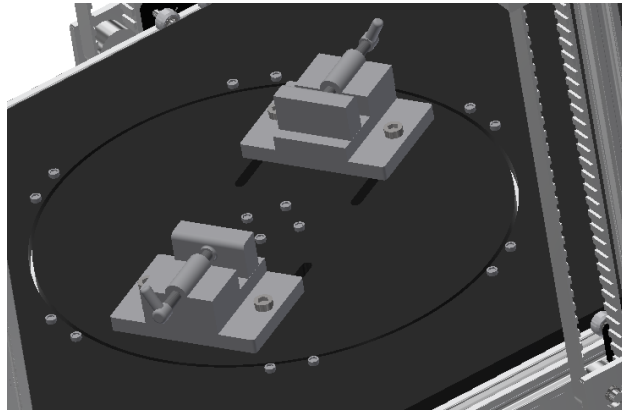


Figura 23. Montaje de la Entenalla de sujeción, (Fuente, autor).

d. Componentes mecánicos

Como ya se escribió en el anterior apartado cada mecanismo está sujeto por algún componente mecánico, cada uno de los componentes son descritos en esta sección según las características necesarias para el manejo de la máquina.

e. Selección de la banda dentada

Como puede apreciarse en la imagen 24, la selección de la correa viene por dimensiones preestablecidas por el fabricante, la implementación de las correas ayuda como medio de transmisión mecánica el movimiento de las columnas laterales y de las guías del soporte del hilo de la máquina cortadora CNC.

El tamaño de la correa es seleccionado según el tamaño del perfil de aluminio de las columnas laterales como: XL/XLDO de 50.8, para el movimiento vertical de la guía lineal y de la estructura mecánica como: XL/XLDO de 76.2 para el movimiento horizontal de la columna lateral.

XL/XLDD	
Std. width (mm)	
	12,7
	19,05
	25,4
	38,1
	50,8
	76,2
	101,6
	152,4
P	5,08
H	2,3
H _i	1,27
H _h	3,05

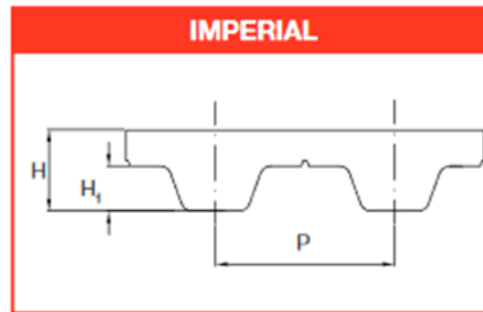


Figura 24. Selección de la banda de transmisión (international, 2021)

f. Selección de los perfiles de Aluminio

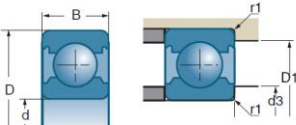
Para el diseño de la estructura y de las columnas de la máquina CNC se utilizan los perfiles de aluminio ya que son livianos y no se requiere de fabricar cada columna, viene establecidas las dimensiones según su tamaño, se disponen de perfiles de 20 milímetros de ancho como de alto, las mismas que están implementadas en el diseño de la cortadora CNC como se muestra en la figura 25.



Figura 25. Selección del perfil de aluminio (internacional, 2021)

g. Selección de los rodamientos

En la imagen muestra una tabla de selección de rodamientos del catálogo SRN que muestra las dimensiones, las velocidades y las fuerzas máxima que pueden soportar el rodamiento, se utiliza el rodamiento RS2 625 para el movimiento de los ejes, donde se acoplan las poleas o las ruedas del carro de guía de las columnas laterales.



d		D	B				
mm	Referencias	mm	mm	10°N	10°N	r.p.m.*	r.p.m.*
3	623	10	4	0,64	0,23	70000	80000
4	624	13	5	1,30	0,49	54000	63000
	634	16	5	1,88	0,68	45000	53000
5	625	16	5	1,88	0,68	47000	55000
	635	19	6	2,46	1,05	34000	40000

Figura 26. ESPE600 SNR (international, 2021)

h. Componentes mecánicos

Componentes	Dimensiones (mm)	Unidades	Material	Observaciones
Perfiles de aluminio de 20x20	20x20x700 mm	2	Aluminio	
	20x20x450 mm	2	Aluminio	
	20x20x500 mm	2	Aluminio	
	20x20x703 mm	2	Aluminio	
Placa metálicas de aluminio	72x42x5 mm	8	Aluminio	Sujecion de motores y poleas
Placa mini V	6.35x50x50 mm	2	Aluminio	Todas las medidas vienen por el fabricante se realiza la compra del kit del deslizador
Rueda V	12mm	8	ABS	
Espaciadores de 1/4"	6 mm	8	Aluminio	
Tornillos	M5x30mm	8	Acero	
Rodamientos 625 2RS	Catalogo SNR	16	Catalogo SNR	Todas las dimensiones y materiales estan disponibles en el catalogo de rodamientos
Banda Dentada	Catalogo megadynegro	4	Catalogo megadynegro	
Piezas de ABS	Varios	10	Varios	Se realiza la fabricación de piezas en la impresora 3D (poleas, sujeciones, etc)
Tabla de Madera	700x450x10mm	1	Madera	
Lamina de acero	740x500x1mm	1	Acero	
Tornillos	M5x60mm	50	Acero	
Braket de esquina	20x20x17mm	10	Acero	

Tabla 4. Listados de componentes mecánico

i. Modelado matemático

En la figura 27 se muestra la máquina CNC, si se analiza desde una perspectiva lateral del diseño, observamos que el movimiento se presenta en las columnas laterales donde se acopla el hilo de corte, la cinemática de este cuerpo actúa en un plano, por lo tanto se determinará la fuerza necesaria para el movimiento de traslación lineal del mismo, la máquina dispone de dos grados de libertad traslación en el sentido de los ejes coordenados X y Y que se muestra en la figura 27, además de tener un tercer grado de libertad de rotación en el eje coordenado Z en la plataforma giratoria donde se asienta la pieza para su mecanizado.

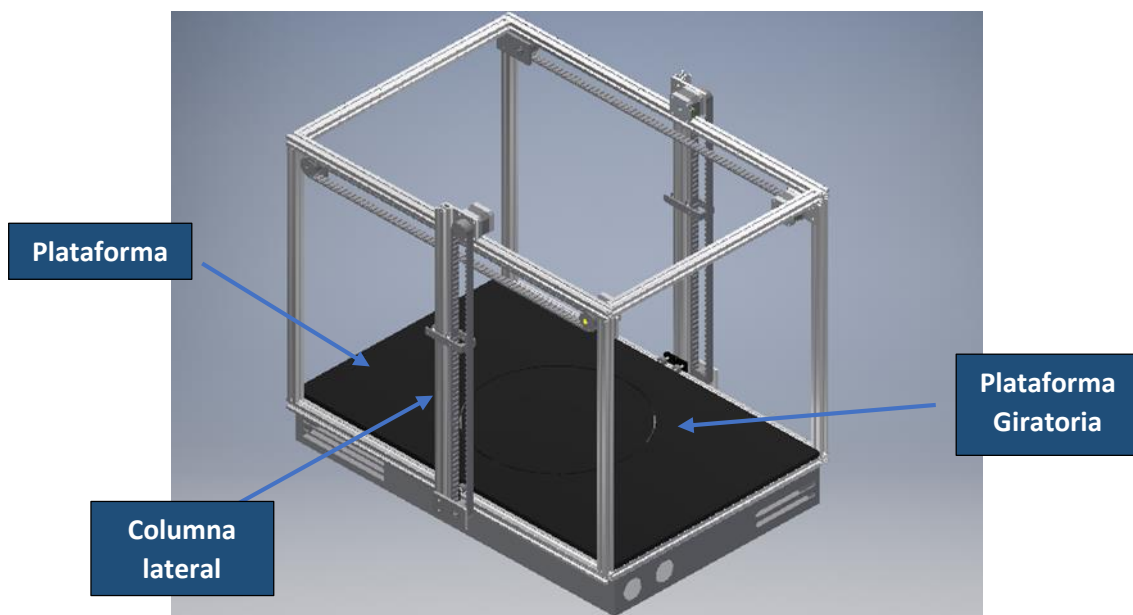


Figura 27. Diseño de la cortadora CNC, incorporación de los grados de libertad, (Fuente, autor).

El análisis se realiza por el mecanismo de las columnas laterales, donde se quiere encontrar todas las fuerzas internas que actúan sobre ella, una forma de detallar cada una de estas fuerzas es crear un diagrama de cuerpo libre como se muestra en la figura 29, lo primero que se necesita es determinar el centro de gravedad que actúa en el punto centro del cuerpo, para luego obtener la fuerza resultante queda el movimiento a este sistema, en la siguiente tabla localiza el centro de gravedad del cuerpo.

Segmento	Elemento	Area (mm^2)	\tilde{X}	\tilde{Y}	$\tilde{X} * area$	$\tilde{Y} * area$
1	Placa negra	2500	25	25	62500	62500
2	Barra	240000	25	300	6000000	72000000
3	Soporte hilo	1120	40	368	44800	412160
4	Placa motor	3024	46	579	139104	1750896
Area Total		246644 mm^2	Sumatoria de centros		6246404	74225556

Tabla 5. Determinación de su centro de gravedad

En la tabla 5 se determina la sumatoria del área total del cuerpo de la columna lateral, hasta ahora el análisis se basa en este mecanismo, ya que el movimiento del hilo dependerá del movimiento de translación de las columnas laterales, cada una de las partes que están unidas a la columna lateral por lo tanto se toman en cuenta en el análisis cinemático del cuerpo, en la ecuación (1) y (2), obtiene el punto centro de gravedad de todo el cuerpo.

$$\bar{x} = \frac{\sum \tilde{X} * \text{área}}{\sum \text{área}} \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{6246404}{246644} = 25.3 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum \tilde{Y} * \text{área}}{\sum \text{área}} \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{74225556}{246644} = 300.9 \text{ mm}$$

En la figura 28 se muestra el diagrama de cuerpo libre del conjunto de las columnas laterales: el motor, la guía lineal, la placa metálica, el carro y el perfil de aluminio, en la imagen muestra la numeración de cada una de las partes del cuerpo y centro de gravedad del cuerpo, el peso del cuerpo actúa en las ruedas superiores del carro, que se descomponen en dos fuerzas FA y FB, de estas fuerzas dependen del análisis cinemático para la obtención de la fuerza resultante.

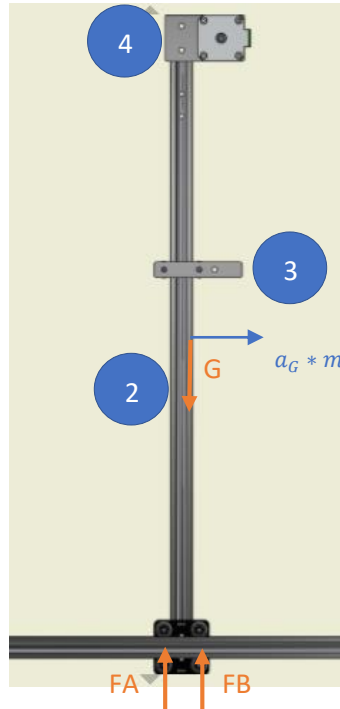


Figura 28. Análisis de fuerzas internas en el mecanismo de las columnas, (Fuente, autor).

En la tabla 6, muestra el conjunto de las partes de la columna lateral con sus respectivos pesos, para determinar el peso total del cuerpo.

Lista de Partes			
Elementos	Cantidades	Numero de Partes	Masa
1	1	Carro	0,45 kg
2	1	Barra	0,214 kg
3	1	Soporte para motor	0,11 kg
4	1	Soporte del Hilo	0,17 kg
5	1	Motor	0,21 kg
Peso total			1,154 kg

Tabla 6. Información de los elementos mecánicos.

Las ecuaciones de movimiento de traslación del centro de masa de un cuerpo rígido, se plantea al sumar todas las fuerzas externas que actúan en el mismo y es igual a su masa por la aceleración en su centro de gravedad, las siguientes ecuaciones describen el análisis de movimiento plano.

$$\sum Fx = m(a_G)_x \quad (1.3)$$

$$\sum Fy = m(a_G)_y \quad (1.4)$$

$$\sum M_G = I_G \alpha \quad (1.5)$$

$$\sum Mp = \sum (M_k)_P \quad (1.6)$$

$$\sum Fy = 0$$

$$F_A + F_B = m_G * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_A + F_B = 1.15 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_A + F_B = 11.32 \text{ N}$$

$$F_B = 11.32 \text{ N} - F_A$$

$$\sum M_G = 0$$

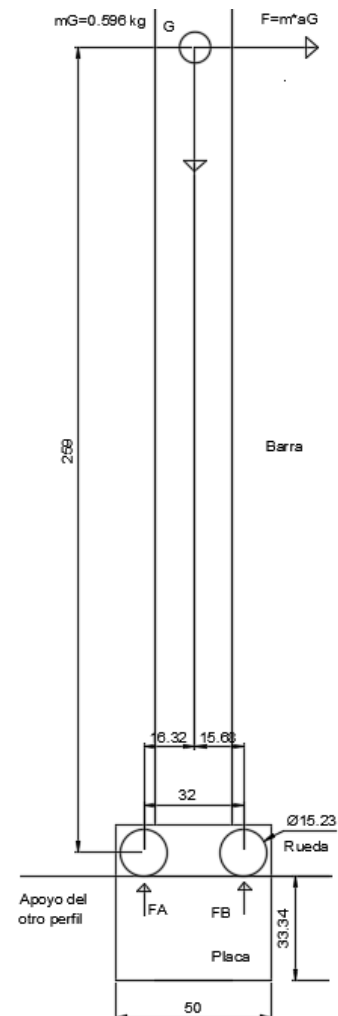
$$(-0.01632 \text{ m})F_A + (0.01568 \text{ m})F_B = 0$$

$$(-0.01632 \text{ m})F_A + (0.01568 \text{ m}) * (11.32 \text{ N} - F_A) = 0$$

$$(-0.01632 \text{ m})F_A + 0.177 \text{ Nm} - 0.01568 F_A = 0$$

$$\frac{0.177 \text{ Nm}}{0.032 \text{ m}} = F_A$$

$$5.53 \text{ N} = F_A$$



$$5.78 \text{ N} = F_B$$

$$\Sigma M_A = \Sigma (M_k)_A$$

$$0.032 \text{ m} * F_B - 0.016 \text{ m} * 1.15 \text{ kg} = -0.259 \text{ m} * 1.15 \text{ kg} * a_G$$

$$\frac{0.032 * F_B - 0.016 * 1.15 \text{ kg}}{0.259 * 1.15 \text{ kg}} = -a_G$$

$$\frac{0.032 * 5.78 \text{ N} - 0.016 * 1.15 \text{ kg}}{0.259 \text{ m} * 1.15 \text{ kg}} = -a_G$$

$$0.55 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = a_G$$

$$0.55 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1.15 \text{ kg} = a_G * m_G = F_{\text{resultante}}$$

$$\mathbf{0.632 \text{ N} = F_{\text{resultante}}}$$

La fuerza necesaria para mover el cuerpo de las columnas laterales es de 0.632 N, al tomar en cuenta la representación de la figura 30, que se muestra la obtención de la inercia equivalente de un carro que transmite en movimiento lineal por medio de una correa, está sujeta a dos pares de poleas, la misma representación de la columna lateral se encuentra en la figura 29, ya que necesita de un carro para trasladar el hilo en un movimiento horizontal.

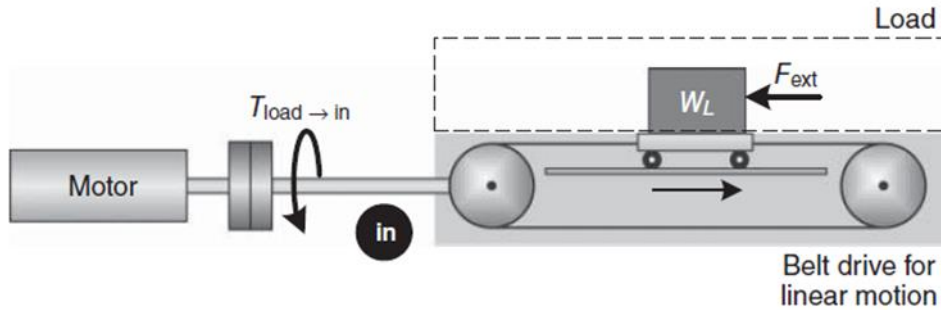


Figura. 30 esquema de transmisión por correa para movimiento lineal. (GUROCAK, 2016).

En la ecuación 1.8 representa la obtención de la inercia de la carga por medio de la transmisión de una correa, donde se expresa que el radio de transmisión de las poleas está dado por la ecuación 1.7 representada por N_B .

$$N_B = \frac{1}{\text{radio de la polea}} \quad (1.7)$$

$$N_B = \frac{1}{0.01859 \text{ m}}$$

$$N_B = 53.792$$

$$J_{equi} = 2 * J_{polea} + \frac{1}{nN_B^2} * \left(\frac{Peso\ total}{gravedad} \right) \quad (1.8)$$

$$J_{equi} = 2 * 4.57 \times 10^{-8} + \frac{1}{0.9 * 53.792^2} * \left(\frac{0.596\ kg}{9.81\ m/s^2} \right)$$

$$J_{equi} = 2.3420 \times 10^{-5}\ kg/m^2$$

La inercia equivalente del conjunto que conforma la columna lateral de la máquina cortador CNC es de $2.3420 \times 10^{-5} \frac{kg}{m^2}$ es necesario establecer que la inercia en las columnas para que determinar la fuerza necesaria que se requiere en los motores a pasos para evitar las pérdidas de pasos por las fuerzas de repulsión en la columna lateral.

j. Sistema de control

Se implementó un sistema de control a partir de la obtención del modelo matemático electromecánico, (Ogata, 2004) capaz de controlar los movimientos de la cortadora CNC, al integrar la velocidad y la posición angular del motor de paso para establecer la interconexión de los dispositivos con el proceso. (Gaviño, 2010).

Se modificará el comportamiento de respuesta del sistema de control en el software Matlab, para su funcionamiento óptimo, al implantar las variables y perturbaciones de entorno en la simulación. (Palm, 2014).

Es necesario implementar un sistema de control a partir de la obtención del modelo matemático electromecánico, (Ogata, 2004) capaz de controlar los movimientos de la cortadora CNC, al integrar la velocidad y la posición angular del motor de paso, para establecer la interconexión de los dispositivos con el proceso. (Gaviño, 2010).

El control de la planta de un motor a pasos es el medio de transmisión electromecánica al movimiento de las columnas laterales de la máquina, el control deberá cumplir con las siguientes características propuestas: debe ser un control en función de las variables de entrada como la posición angular del eje motor y las variables de salida en la posición angular y la velocidad angular de la planta con una respuesta del control de lazo cerrado, y que se pueda implementar controlador PID para asegurar eficiencia del sistema, además que pueda resistir a ciertas perturbaciones dentro del sistema como: la alteración del torque a la salida del motor o la alteración de la posición angular, todas estas características deben ser validadas por medio de un simulador Matlab para reconocer la mejor optimización del sistema, en la figura 31 muestra el control de la planta del sistema.

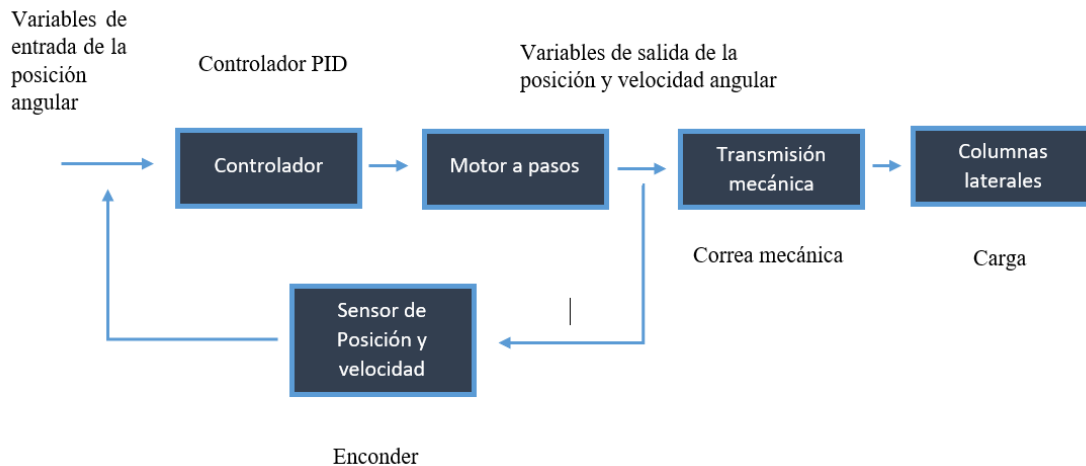


Figura 31. Control del sistema de la Planta. (Fuente, autor)

k. Diseño de control del motor a pasos

Antes de determinar la potencia necesaria del motor a pasos, se tendrá presente la estabilidad del sistema electromecánico en los rangos de velocidad angular y torque en la respuesta del sistema mediante un modelo matemático, que determina el comportamiento del motor a pasos en el posicionamiento angular que depende de ciertos parámetros que estarán impuestas en la máquina.

1. Dinámica del motor a pasos

La dinámica del motor a pasos se inicia con la estructura mecánica interna del motor a pasos, en la figura 32 muestra el diseño interno del motor pasos, se puede observar que en cada polo se encuentran cada una de las bobinas del motor, en la representación de la figura son las bobinas A y B, que simbolizan cada fase del motor a pasos, el rotor está diseñado por los dientes, que identifican la polaridad del norte y sur de un núcleo de imán permanente.

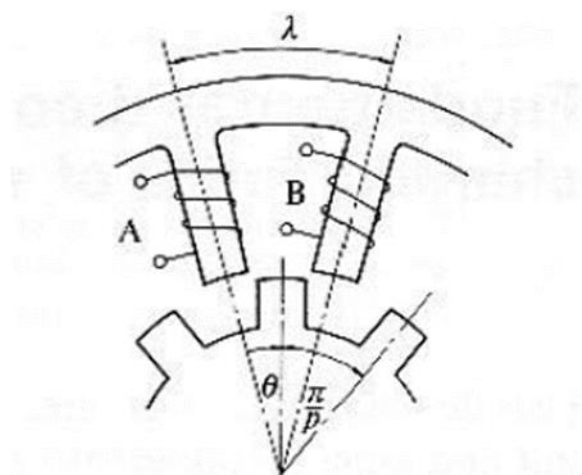


Figura 32. modelo para motor a pasos usando el análisis electromagnético

En la ecuación (1.9) y (1.10) representan los torques producidos por las fuerzas electromotrices de en las bobinas, estas ecuaciones dependen del campo magnético que es producido en cada uno de los polos, denotando p como el número de dientes, n el número de espiras de la bobina y φ_M como el campo magnético del núcleo de los polos

$$T_A = -pn\varphi_M i_A \sin p\theta \quad (1.9)$$

$$T_B = -pn\varphi_M i_B \sin(p\theta - \lambda) \quad (1.10)$$

La ecuación de movimiento del rotor está representada en la ecuación (1.11) donde se obtiene la sumatoria de todos los torques que se encuentran en el interior del motor a pasos, en esta ecuación denotamos D como la viscosidad de fricción del motor y J como la inercia del rotor.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\varphi_M i_A \sin p\theta + pn\varphi_M i_B \sin(p\theta - \lambda) = 0 \quad (1.11)$$

Al final la ecuación (1.11) puede quedar expresado en función de la posición inicial del primer polo θ_i y el segundo polo θ_o en función del tiempo, como se observa en la ecuación (1.12).

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\varphi_M i_A \sin p\theta_i + pn\varphi_M i_B \sin(p\theta_o - \lambda) = 0 \quad (1.12)$$

Al transformar al dominio de la place la ecuación (1.12) y factorizando algunos términos, queda como resultado la ecuación (1.13).

$$(s^2J + sD + 2p^2\varphi_M nI)\theta_o(s) = (2p^2\varphi_M nI)\theta_i(s) \quad (1.13)$$

Despejando la ecuación (1.13), obtenemos la ecuación de transferencia $G(s) = \frac{\theta_o}{\theta_i}$, siendo la ecuación (1.14).

$$G(s) = \frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{2p^2\varphi_M nI}{Js^2 + sD + 2p^2\varphi_M nI} = \frac{w_n^2}{s^2 + \frac{D}{J}s + w_n^2} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (1.14)$$

$$\xi = \frac{D}{2Jw_n} \quad (1.15)$$

$$w_n = \frac{p*k*I}{J} \quad (1.16)$$

$$k = \frac{\varphi_M * r}{l * v} \quad (1.17)$$

$$\varphi_M = \frac{t * r}{v * p} \quad (1.18)$$

Donde:

ξ = radio de oscilacion

J = Inercia equivalente

w_n = velocidad angular

p = numero de dientes

φ_M = flujo magnetico

D = coeficiente de viscosidad

I = corriente

t = torque estatico

v = voltaje

r = resistencia del motor

l = inductancia

Con los siguientes parámetros obtenemos la respuesta del sistema subamortiguado, ya que el motor contiene una carga en el eje del rotor, esto impide que el motor trabaje correctamente ya que este produce una resonancia oscilatoria mecánica que permite que el motor pierda pasos al momento de su activación.

La inercia total esta sumada la inercia del rotor y la inercia equivalente.

$$\begin{array}{ll}
 J = 2.8820\text{e-}05 \text{ kg/m}^2 & l = 0.0028 \text{ H} \\
 \varphi_M = 0.0028 & t = 0.22 \text{ s} \\
 D = 0.0217 & I = 1.7 \text{ A} \\
 v = 5 \text{ v} & p = 48 \\
 r = 3 \text{ ohm} &
 \end{array}$$

Al disminuir la velocidad angular del motor obtiene mayor torque por lo tanto su comportamiento a la respuesta es aceptable, lo que se presenta sobre amortiguación en la respuesta del sistema y su tiempo de asentamiento es de 0.0129 s, como se observa en la figura

$$\begin{aligned}
 w_n &= 400 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\
 \xi &= 0.9412
 \end{aligned}$$

El resultado de la función de transferencia que expresado en la ecuación 1.20, los valores impuestos dependen los parámetros descriptos anteriormente.

$$G(s) = \frac{160000}{s^2 + 752.9 s + 160000} \quad (1.20)$$

En la figura 33 y 34 muestran el sistema de control de la planta, hace referencia a la función de transferencia de la ecuación (1.20), en la figura 34 se observa el sistema de la planta del motor y en la figura 33 se observa el subsistema interno que está integrado en la figura 34, la respuesta responde a una perturbación en el torque a la salida en una señal sinusoidal, a la carga de inercia y al torque de carga del mecanismo, como se observa la variable de entrada de la señal en la figura 34 es la posición angular del sistema de la planta y la salida se observa las variables de posición y velocidad angular como variables de salida, en la figura 35 muestra la respuesta de las variables de posición y velocidad angular del sistema del sistema.

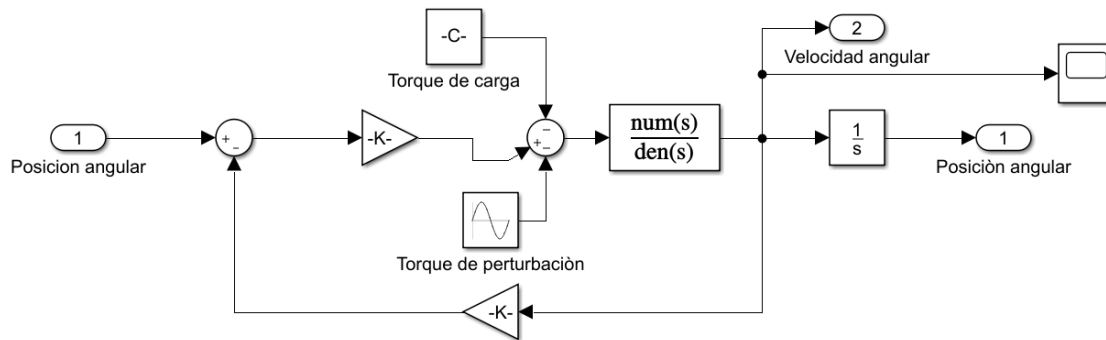


Figura 33. Sistema de la planta en el software de Simulink (Fuente, autor).

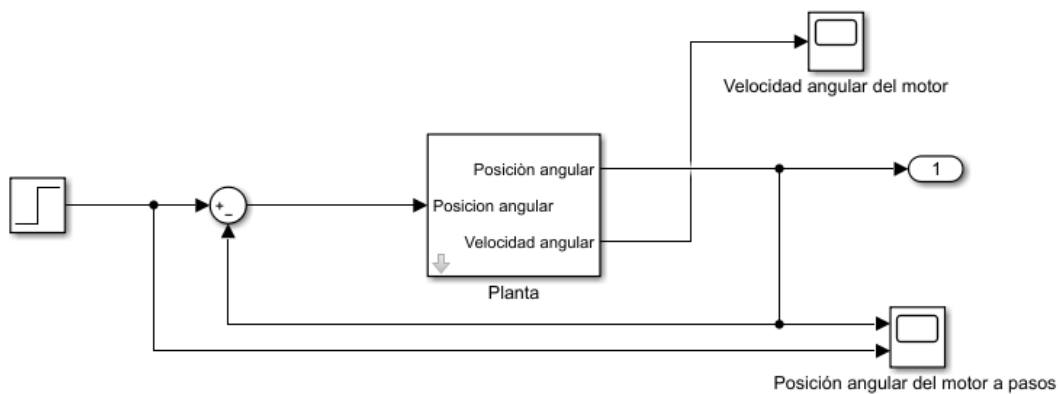


Figura 34. Sistema de la planta en el software de Simulink (Fuente, autor).

A la salida del sistema se observa las variables de la posición y de la velocidad en la figura 35, la respuesta de la velocidad esta de color verde en la gráfica y la respuesta de color azul está en la misma gráfica, se puede analizar que al principio la velocidad excede a un pico alto donde se efectúa el arranque del motor y después llega a cero cuando el motor llega a su posición angular final.

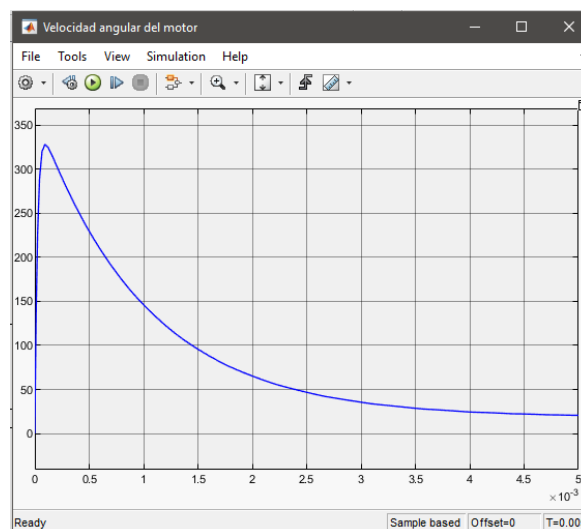


Figura 35. Respuesta del sistema en la velocidad. (Fuente, autor).

En la figura 36 se establece la variable de posicionamiento angular del motor y la salida real de la respuesta de posición angular del motor, como se puede observar la curva de color azul es donde se quiere llegar a la posición angular y la línea verde es la respuesta que nos da el sistema, se muestra que la línea verde no alcanza la posición preestablecida ósea a 1 radian.

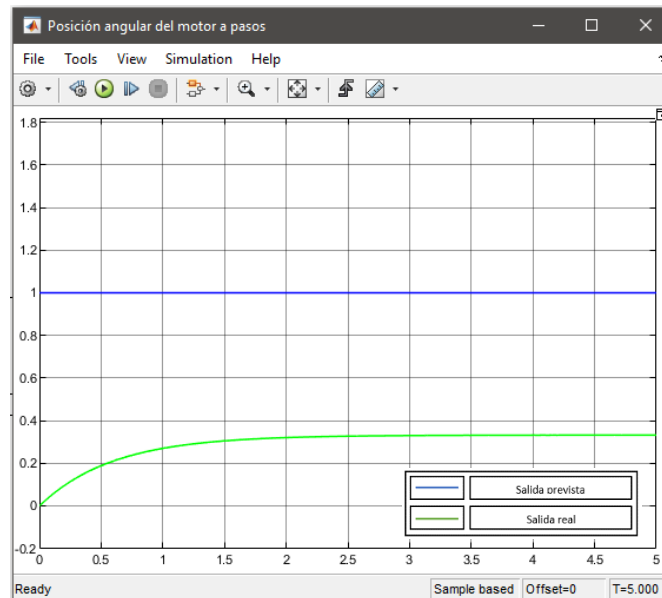


Figura 36. Respuesta prevista y respuesta real de la planta. (Fuente, autor).

En la figura 37 se incorpora controlador PID para que se solucione el problema de la respuesta del sistema, ósea que alcance la posición deseada del motor, y la figura 38 se muestra el resultado de incorporar un controlador PID al sistema, en la sección 5.19 describe cómo se obtuvo el controlador PID y sus constantes mediante Toolbox de Simulink.

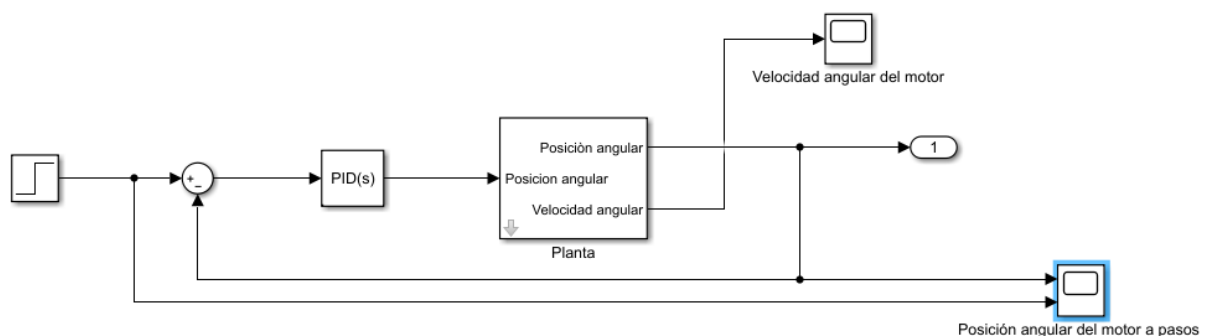


Figura 37. Sistema de la planta y control PID en el software de Simulink (Fuente, autor).

Las constantes del controlador PID, se establecen gracias al algoritmo de simulación de Simulink que tiene la herramienta de ajustar las constantes del control según la preferencia de respuesta del sistema.

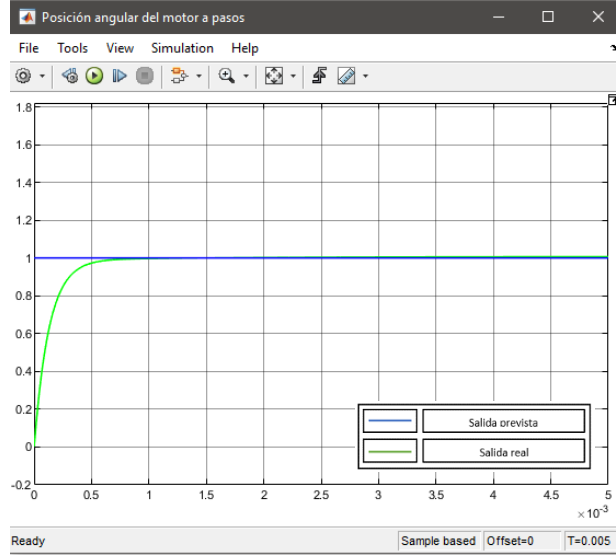


Figura 38. Reajuste de la respuesta real del sistema de la planta. (Fuente, autor).

Una vez determinada los rangos de velocidad para estabilidad del sistema y la fuerza necesaria para el movimiento del cuerpo, se procede a determinar el torque necesario del motor que va dar movimiento al cuerpo. La aceleración se obtiene al partir de la velocidad angular en un tiempo determinado en este caso sería el tiempo de asentamiento de la respuesta del sistema ya que es el tiempo que toma en moverse de un ángulo a otro en el eje del rotor del motor.

$$\ddot{\theta} = \frac{\dot{\theta}}{t} = \frac{400 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{0.0129 \text{ s}} = 3100.8 \text{ rad}$$

$$T_{\text{motor necesario}} - T_{\text{carga}} = \ddot{\theta} * J_{eq} \quad (1.21)$$

$$T_{\text{motor necesario}} = \ddot{\theta} * J_{eq} + T_{\text{carga}} \quad (1.22)$$

$$T_{\text{motor necesario}} = 3100.8 * 2.8820e - 05 + 0.000631 * 0.01859$$

$$T_{\text{motor necesario}} = 0.0894 \text{ N} * \text{m} \quad (1.23)$$

Al establecer el torque necesario, se determina el torque a la salida del motor a pasos según los parámetros impuestos en el sistema y se compara la eficiencia de potencia del mismo.

$$T_{\text{salida}} = \frac{p*y*v}{\sqrt{r^2+w^2}*l^2} - \frac{p*w*y^2*r}{r^2+w^2*l^2} \quad (1.24)$$

$$T_{\text{salida}} = 0.1636 \text{ N} * \text{m}$$

Como se puede observar cumple con lo establecido anteriormente, el motor a pasos nema 17 puede soportar la carga impuesta en la máquina cortadora CNC.

$$Factor_{efi} \frac{T_{\text{salida}} - T_{\text{motor necesario}}}{T_{\text{salida}}} = \frac{0.1636 \text{ N*m} - 0.0894 \text{ N*m}}{0.1636 \text{ N*m}} = 45.35 \quad (1.25)$$

m. Análisis del dinámico de la guía lineal movimiento vertical

Del mismo modo se inicia con el modelo matemático, pero esta vez analizando desde el mecanismo de guía lineal, el motor que se encuentra acoplado encima del perfil del perfil de la columna lateral, recibirá la carga del peso de la guía lineal como se observa en la figura 39, la transmisión mecánica es la correa acoplada a la polea dentada, que transmite el movimiento en dirección vertical.

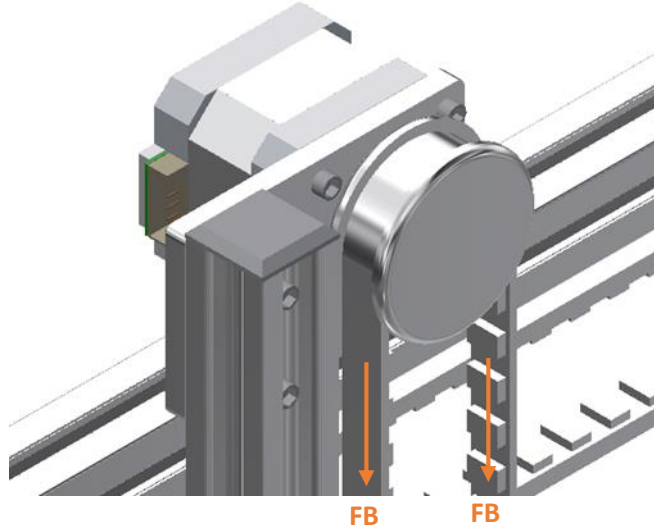


Figura 39. Exposición de fuerzas internas (Fuente, autor).

La fuerza FB es determinada mediante la ecuación 1.26, donde se multiplica la masa de 0.17 kg del mecanismo de sujeción del hilo, la guía lineal, con la gravedad para obtener el peso del mecanismo, y el torque de carga es multiplicada el radio de la polea de 15 mm por la fuerza FB, este torque se expresa en la ecuación 1.27.

$$FB = \text{Peso de la guía} * \text{gravedad}$$

$$FB = 0.17 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (1.26)$$

$$FB = 0.166 \text{ N}$$

$$\text{Torque de la carga} = TB = FB * \text{radio de la polea}$$

$$TB = 0.166 \text{ N} * 0.015$$

$$TB = 0.00249$$

La obtención de la inercia del mecanismo es parecida al cálculo de la inercia expresada anteriormente, con la única diferencia que se toma el peso extra del mecanismo, ósea los 0.17 kg de la guía lineal, ya que el mecanismo se desplaza en sentido vertical.

$$N_B = \frac{1}{\text{radio de la polea}} \quad (1.27)$$

$$N_B = \frac{1}{0.015 \text{ m}}$$

$$N_B = 66.66$$

$$J_{equi} = 2 * J_{polea} + \frac{1}{nN_B^2} * \left(\frac{\text{Peso total}}{\text{gravedad}} \right) \quad (1.28)$$

$$J_{equi} = 2 * 4.57 \times 10^{-8} + \frac{1}{0.9 * 66.66^2} * \left(\frac{0.17 \text{ kg}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right)$$

$$J_{equi} = 4.42 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

El análisis de la respuesta del control se obtiene mediante la simulación en software de Simulink en la figura 40 y 41, al igual que anterior análisis se toma en cuenta los parámetros del motor, pero a diferencia del torque de carga y la inercia del sistema.

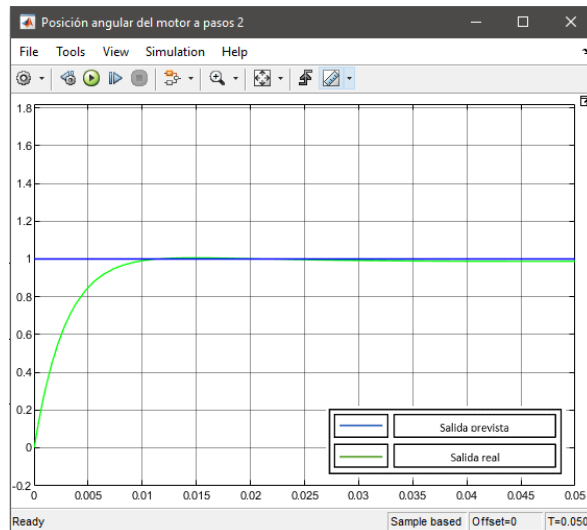


Figura 40. Reajuste de la respuesta real del sistema de la planta del segundo motor.
(Fuente, autor).

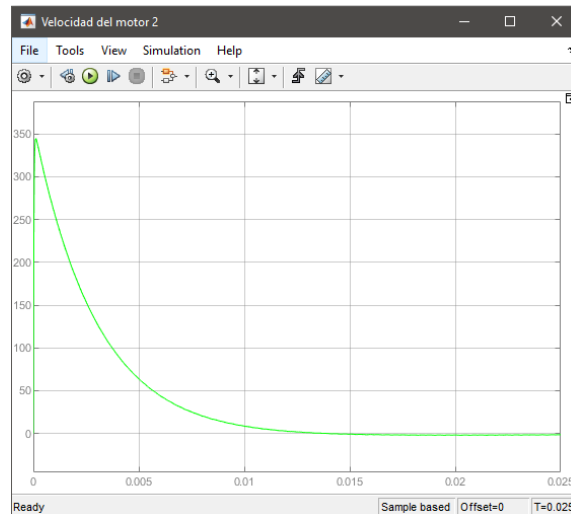


Figura 41. Respuesta del sistema en la velocidad del segundo motor. (Fuente, autor).

n. Sistema Electrónico

La transmisión de potencia eléctrica hacia los motores se propone por medio de un circuito electrónico de control de potencia, las leyes fundamentales y los teoremas determinan el funcionamiento correcto sistema eléctrico. (Allan H. Robbins, 2008).

En el siguiente diagrama representa el protocolo de comunicación de los diferentes dispositivos que van estar enlazados entre sí, se inicia con el control del usuario hacia el ordenador para indicar las funciones que va realizar la máquina y por medio de un control de potencia ayudara al accionamiento de los actuadores que dan movimiento a la máquina. (Palm, 2014).

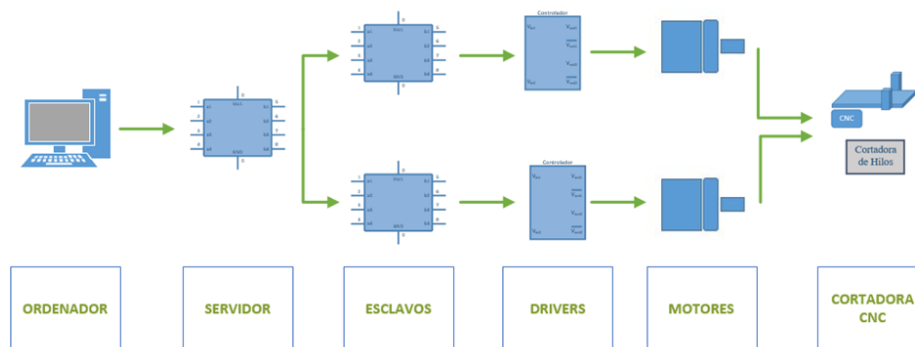


Figura 42. Diagrama jerárquico de comunicación entre el ordenador y la máquina, (Fuente, autor).

El ordenador tiene la interacción con el usuario, realiza las órdenes a la máquina cortadora de hilos CNC por medio del maestro, el cual es un microcontrolador, el maestro recibe las ordenes de datos mediante un código de máquina, ordena los datos y los envía por un conjunto de tramos a cada uno de los esclavos (microcontroladores) para indicar las acciones que deben realizar, los esclavos transmiten las señales PWM a cada uno de los circuitos de potencia que alimentan los motores de pasos.

o. Análisis de potencia del circuito eléctrico

En este apartado analiza el sistema de potencia de los motores a pasos, para determinar la alimentación de potencia de la planta.

p. Circuito de control para un motor bipolar

Partiendo de los parámetros que tiene el motor se determina la potencia que pasa en la bobina en un intervalo de tiempo de accionamiento. (Consultants, 2009).

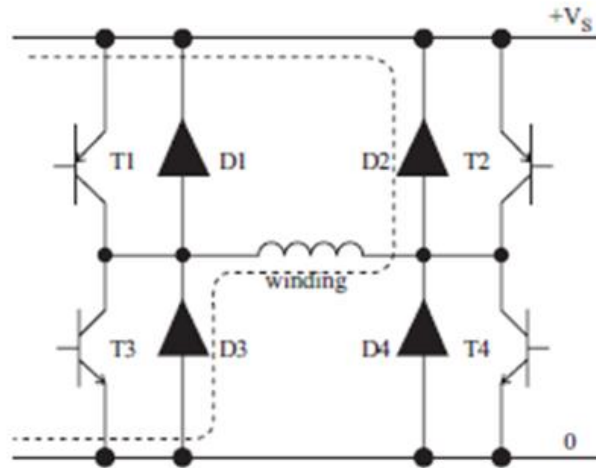


Figura 43. One phase of a transistor bridge bipolar drive circuit (Consultants, 2009).

Cuando el motor se energiza, dentro de la bobina pasa una corriente que se almacena dentro de ella, esta corriente tiende a invertir de polaridad o el sentido, cuando la bobina queda energizada, en ese momento crea un campo magnético que se atrae las polaridades del rotor con la bobina, en el transcurso de ese tiempo se determina la potencia por medio del voltaje de la bobina y de la corriente que circula, al final se crea una sumatoria de todas las potencia que pasan en cada una de las bobinas del motor para determinar la potencia total, una vez determinada la potencia total de la máquina se escoge una fuente de alimentación que pueda alimentar a todos los motores de la máquina.

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{tR}{L}} - \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right) \quad (1.29)$$

$$L = 0.0028 \text{ H}$$

$$R = 1.5 \text{ ohm}$$

$$E = 5 \text{ v}$$

$$i = \frac{20}{3} e^{-\frac{1.5*t}{0.0028}} - \frac{10}{3}$$

$$i = 0$$

$$0 = \frac{20}{3} e^{-\frac{1.5*t}{0.0028}} - \frac{10}{3}$$

$$t = \frac{-0.0028 * \ln(0.5)}{1.5}$$

$$t = 0.00129 = 1.29 \text{ ms}$$

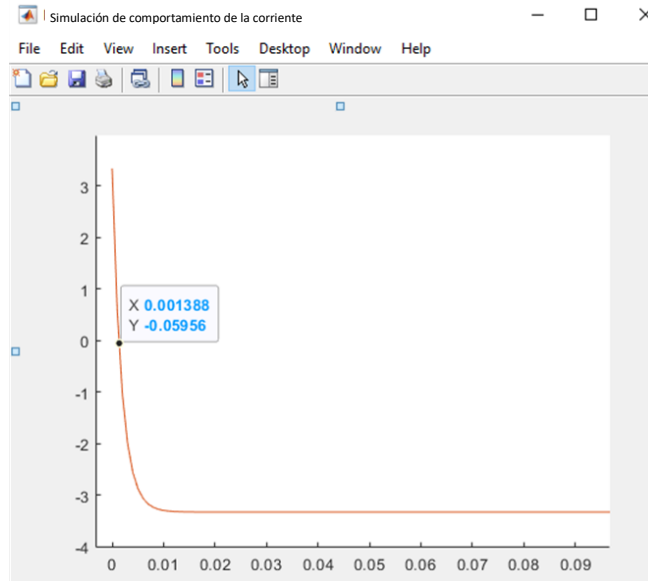


Figura 44. Simulación de comportamiento de la corriente, (Fuente, autor).

$$Potencia = \int_0^t E * i \, dt = \int_0^t 5 * \left(\frac{20}{3} e^{-\frac{1.5*t}{0.0028}} - \frac{10}{3} \right) dt \quad (1.30)$$

$$Potencia = \int_0^t E * i \, dt = \left[-\frac{100 * 0.0028}{3 * 1.5} e^{-\frac{1.5*t}{0.0028}} - \frac{50}{3} * t \right]_{0}^{1.29 \, ms}$$

$$Potencia = \int_0^t E * i \, dt = -0.0312 - 0.0215 + 0.0622 = 0.095 \, J$$

$$Potencia = 95 \, mJ$$

$$Potencia_{motor} = 95 \, mJ * 2 = 190 \, mJ$$

$$Potencia_{Total} = Potencia_{motor} * numero \, de \, motores$$

$$Potencia_{Total} \approx 190 \, mJ * 5 \approx 950 \, mJ$$

Se requiere de una fuente de alimentación de una potencia 950 mJ (voltaje de 5 v, mayor a corriente 1.9A) para accionar los motores de pasos de la máquina, además se utilizará un controlador de pasos como L293 que en un puente H para controlar un motor bipolar de pasos nema 17.

$$Potencia = Voltaje * Corriente$$

$$950 \, mJ = 5V * Corriente$$

$$1.9 \, A = Corriente$$

Modulador de calefacción

La transmisión de calor del alambre hacia el material, depende de la potencia eléctrica que pasa por la resistencia del alambre, un modulador de voltaje amplifica y regula la potencia eléctrica del alambre, obteniendo un ajuste de nivel de temperatura adecuado para el corte del material, en la figura 45 muestra el modulador de voltaje para el ajuste de esta potencia, al variar el potenciómetro tiende a subir o bajar el voltaje, va estar conectado en el alambre ferroníquel.



Figura 45. Modulador de voltaje. (Arduino,2020)

q. Tabla de componentes

En la siguiente tabla muestra los componentes electrónicos para la implementación de la máquina en el desarrollo del proyecto, el diseño de la tarjeta electrónica será comprada en el mercado, porque la mayoría de componentes electrónicos dispondrán de soldadura superficial (SMD).

Componentes Electrónicos	
Nombres	Cantidad
Fuente de alimentación 4 A	1
Motor a Pasos	5
L293	5
Pic 16f877a	1
Pic 16f1769	5
Borneras de 4	2
Borneras de 2	2
Cristales de 4Mhz	3
Capacitores 22pf	6
Placa cobre 200X200 mm	1
Pines de 4	2
Cables Hembra-Hembra de 4	2
Alambre de resistencia Ferroníquel	1
Modulo Elevador De Voltaje	1
Resistencias 1,5 kΩ	5
Capacitores 1mF	3

Tabla 7. Componentes y equipos electrónicos.

r. Análisis cinemático del mecanismo

Para determinar la posición del hilo, el centro de la guía lineal, se comienza con el diagrama de cuerpo libre como se muestra en la figura 45, en él se colocan cada uno de los vectores de posición de la máquina, el vector R_a representa la posición de la columna lateral y el vector R_b la posición de la guía lineal ambos vectores respecto al origen, se analiza la posición de cada vector, el vector R_a parte del centro de la columna lateral al origen y el vector R_{ab} parte del centro de la guía lineal respecto al centro de la columna lateral, para determinar el vector de posición R_b respecto al origen se suman los vectores R_a y R_{ab} , como se muestra la ecuación (1.30).

$$R_b = R_a + R_{ab} \quad (1.30)$$

En este apartado se realiza el análisis de posición de la columna lateral y la guía lineal de la máquina, el análisis cinético del sistema mecánico se determinó anteriormente en la sección 5.9, se determinó que la fuerza resultante dependía de las fuerzas internas del conjunto mecánico, ahora que ya se conoce la fuerza máxima que puede mover el mecanismo, partimos con el análisis cinemático con la determinación de la aceleración en la ecuación 1.31, donde expresa que la fuerza que se requiere mover un cuerpo es igual a la masa multiplicado por su aceleración, una vez obtenida la aceleración, se puede conocer la velocidad y la posición del cuerpo.

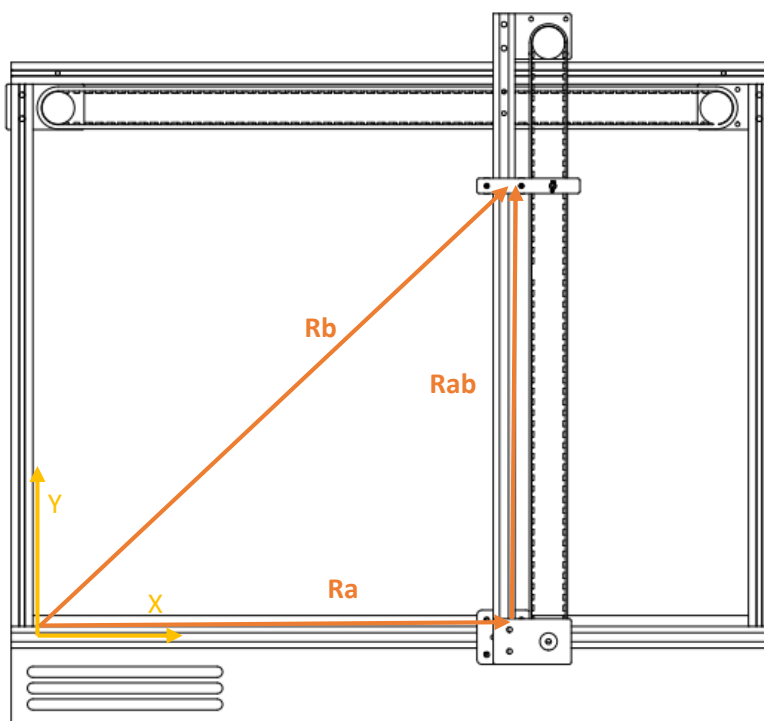


Figura 45. Diagrama de cuerpo libre. (Fuente, autor).

$$F = m * a \quad (1.31)$$

$$\frac{F}{m} = a$$

$$v = \int a \, dt = \int_0^t \frac{F}{m} \, dt \quad (1.32)$$

$$v = \left[\frac{F}{m} * t \right]_0^t$$

$$p = \int_0^t v \, dt \quad (1.33)$$

$$p = \left[2 * \frac{F}{m} * t^2 \right]_0^t$$

Supongamos que se requiere impulsar a la columna lateral con una fuerza igual a $F = 50$, se determina la velocidad y la posición del mecanismo, por medio de las ecuaciones 1.31 y 1.32.

$$v = \frac{F}{m} * t$$

$$v = \frac{1}{m} * (50t - 0)$$

$$v = \frac{1}{m} * (50t)$$

$$p = \frac{1}{m} * \int_0^t 50t \, dt$$

$$p = \frac{1}{m} * (50t^2 - 50t)$$

El resultado se grafica en el software de Matlab para observar movimiento cinemático del cuerpo de la columna lateral, como puede observarse en la figura 46,47 y 48 representan la fuerza, la velocidad y la posición de la columna lateral, respectivamente.

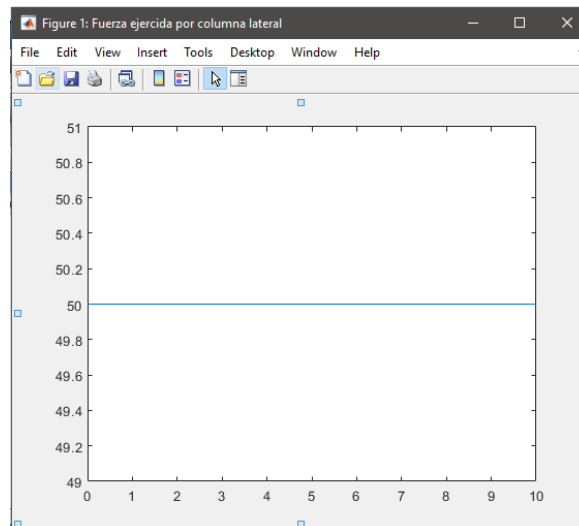


Figura 46. Fuerza ejercida en el mecanismo. (Fuente, autor).

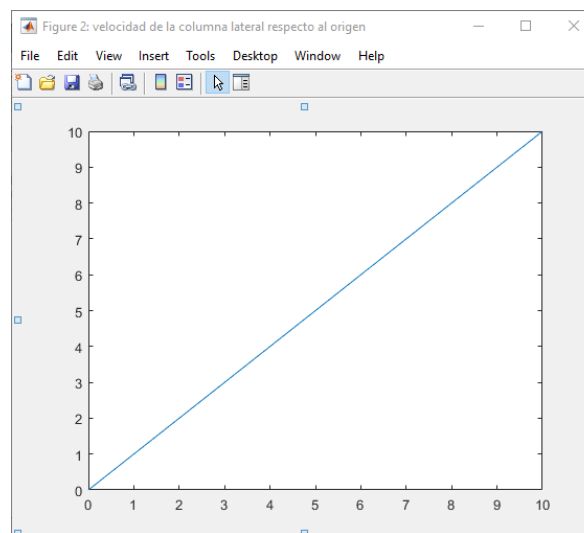


Figura 47. Velocidad del mecanismo (Fuente, autor).

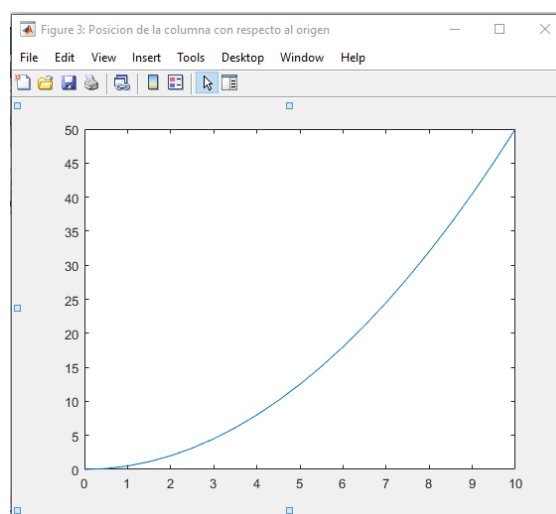


Figura 48. Posición del mecanismo (Fuente, autor).

Para determinar el vector de posición de R_{ab} respecto al centro de la columna lateral, se aplica las mismas ecuaciones de movimiento de traslación 1.31 y 1.32, al igual según la fuerza que se aplica en el mecanismo el resultado obtendrá una posición diferente.

Supongamos que se requiere impulsar a la guía lateral con una fuerza igual a $F = 25$, se determina la velocidad y la posición del mecanismo, por medio de las ecuaciones 1.31 y 1.32.

$$v = \frac{F}{m} * t$$

$$v = \frac{1}{m} * (25t - 0)$$

$$v = \frac{1}{m} * (25t)$$

$$p = \frac{1}{m} * \int_0^t 25t \, dt$$

$$p = \frac{1}{m} * (25t^2 - 25t)$$

El resultado se grafica en el software de Matlab para observar movimiento cinemático del cuerpo de la columna lateral, como puede observarse en la figura 49,50 y 51 representan la fuerza, la velocidad y la posición de la columna lateral, respectivamente.

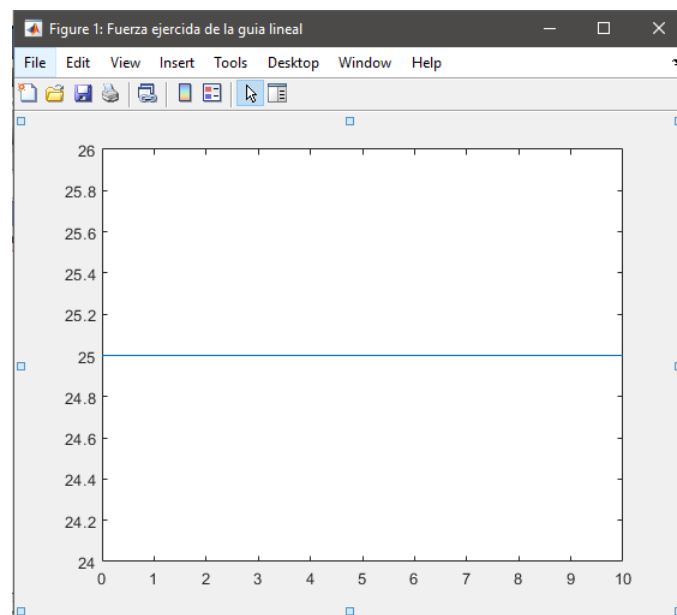


Figura 49. Fuerza ejercida en la guía lineal. (Fuente, autor).

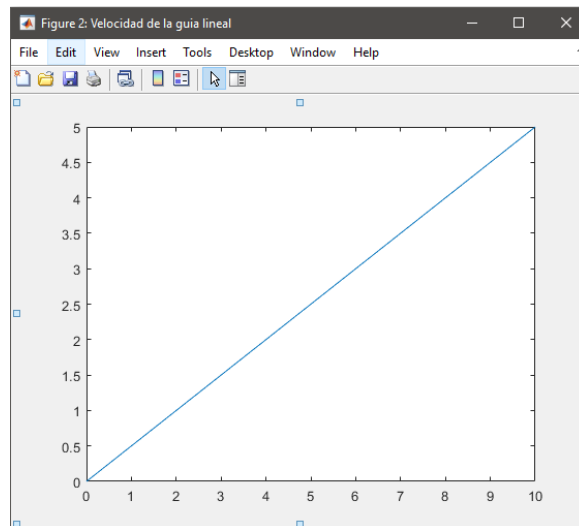


Figura 50. Velocidad de la guía lineal (Fuente, autor).

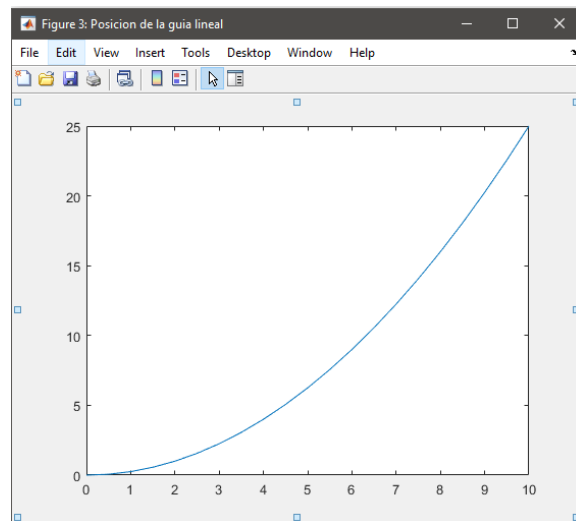


Figura 51. Posición de la guía lineal (Fuente, autor).

El desplazamiento del hilo se determina por la ecuación 1.30, en el que se explicó anteriormente que los vectores de posición y velocidad se determinan, por medio de la suma de los vectores de posición y velocidad.

s. Circuito Esquemático

En la elaboración del control de los cinco motores a pasos se requiere que cada motor esté conectado a un driver de potencia por lo tanto se requiere de 5 circuitos al igual que el número de microprocesadores que envían los pulsos de control. El diseño del circuito que se muestra en la figura se desarrolló en el software Eagle de la compañía de Autodesk muestra el conjunto de conexiones electrónicas de los microcontroladores y del sistema de potencia para ser conectados a los motores pasos cada uno de los circuitos están conectados por medio de puentes de enrutamiento para mejor visibilidad en la construcción de la máquina cortadora CNC.

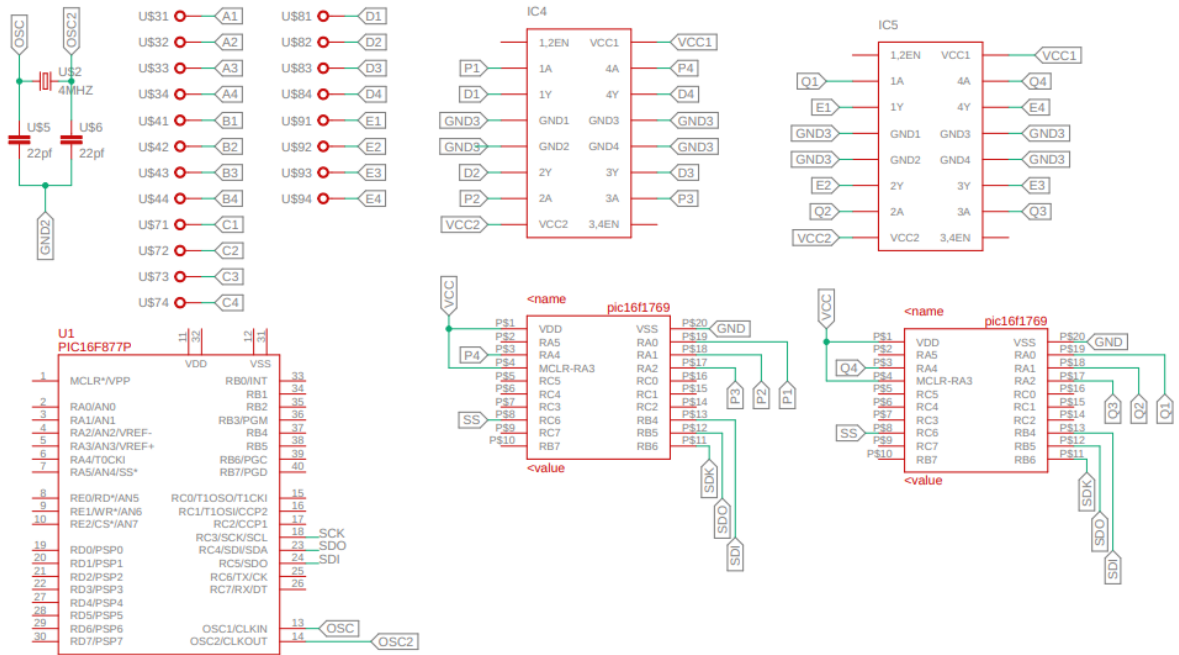


Figura 50. Circuito esquemático (Fuente, autor).

5.20 Implementación del controlador PID al sistema

En esta sección se requiere obtener la implementación del controlador PID en el circuito electrónico, como se mencionó en la sección anterior el controlador PID se encuentra acoplado junto a la planta del motor a pasos, el controlador estará implementado dentro del microcontrolador, lo cual se requiere que la función de transferencia sea convertida a la transformada z.

5.20 Obtención de la transformada z del controlador

El controlador PID se puede indicar mediante la ecuación 1.33, donde $e(t)$ expresa el error de la señal, $u(t)$ la entrada de la señal, K_p constante de proporcionalidad, T_i constante integrador, T_d constante derivativa.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.33)$$

Las constantes de las ecuaciones se obtuvieron mediante Toolbox de Simulink, asignando un comportamiento de respuesta efectivo donde expresa los siguientes parámetros de las constantes del controlador.

$$K_p = 44.62$$

$$T_i = 6.21$$

$$T_d = 0.63$$

Para la realización de un controlador PID en función de un tiempo discreto esta dado por la ecuación 1.34 y 1.35:

$$U(z) = E(z)K_p \left[1 + \frac{T}{T_i(1 - z^{-1})} + \frac{T_D(1 - z^{-1})}{T} \right] \quad (1.34)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = a + \frac{b}{1 - z^{-1}} + c(1 - z^{-1}) \quad (1.35)$$

La ecuación 1.36 y 1.37 se expresan en base al tiempo T, donde en el diagrama de Ziegler/Nichols del PID de lazo abierto en la aplicación de un escalón el tiempo T nos muestra T=0.001s:

$$\text{Donde } T = \frac{T_0 - T_1}{10} = 0.001 \text{ s}$$

$$a = K_p = 44.62$$

$$b = \frac{K_p * T}{T_i} = 7.18T$$

$$c = \frac{K_p * T_D}{T} = \frac{28.11}{T}$$

$$U[k] = K_p * [e(k) + \frac{T}{T_i} * \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} * (e(k) - e(k - 1))]$$

$$U[k] = 44.62 * e(k) + 7.18 * T * \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{28.11}{T} * (e(k) - e(k - 1))$$

5.21 Validación del Control de PID en el software de Proteus.

Las constantes y las ecuaciones diferenciales se utilizan en la programación del microcontrolador, por medio de lenguaje CSS de C, en el anexo B muestra la programación del microcontrolador para activación de los motores pasos y la incorporación del control PID.

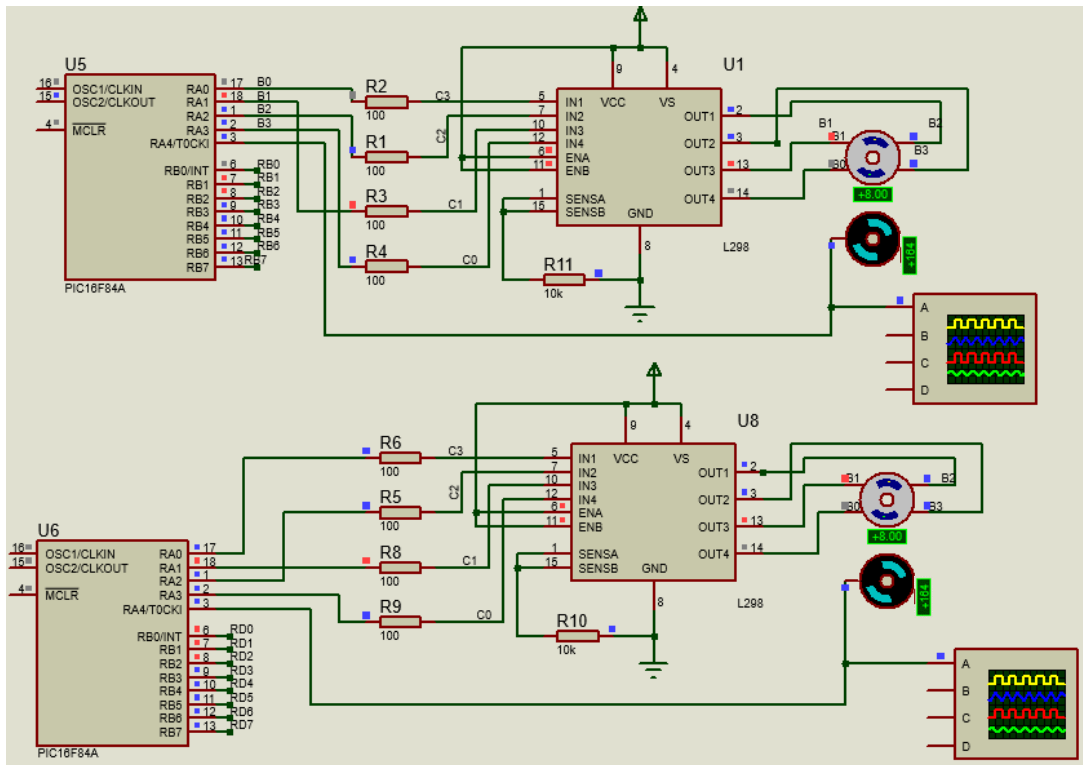


Figura 50. Validación de la simulación incorporada el PID en el microcontrolador

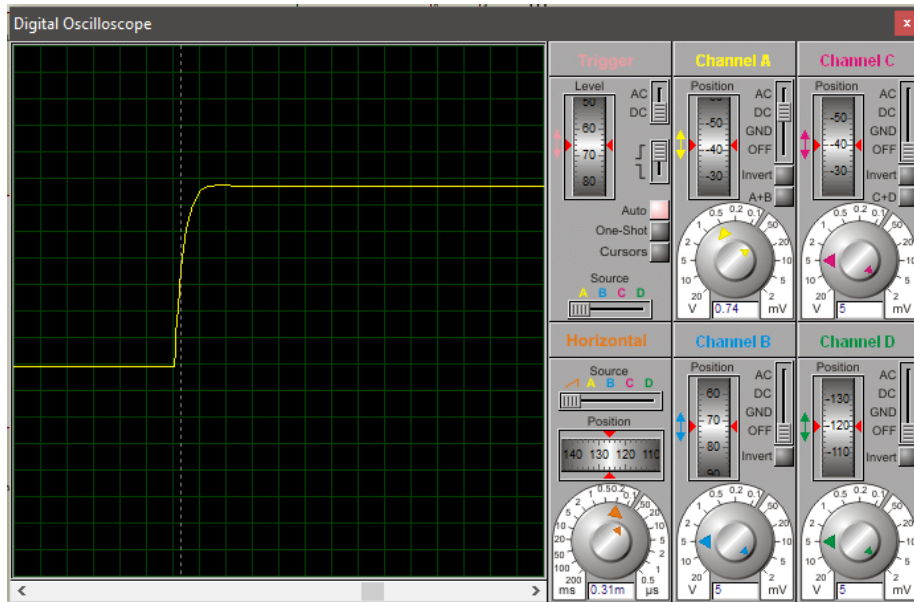


Figura 51. Resultado de la respuesta del sistema.

6. RESULTADOS

El diseño final de la estructura mecánica se observa en la figura 52, el bosquejo se realizó por medio del software inventor, las dimensiones de la estructura están de acuerdo a las preferencias del uso de la máquina en la empresa Plastex S.A.

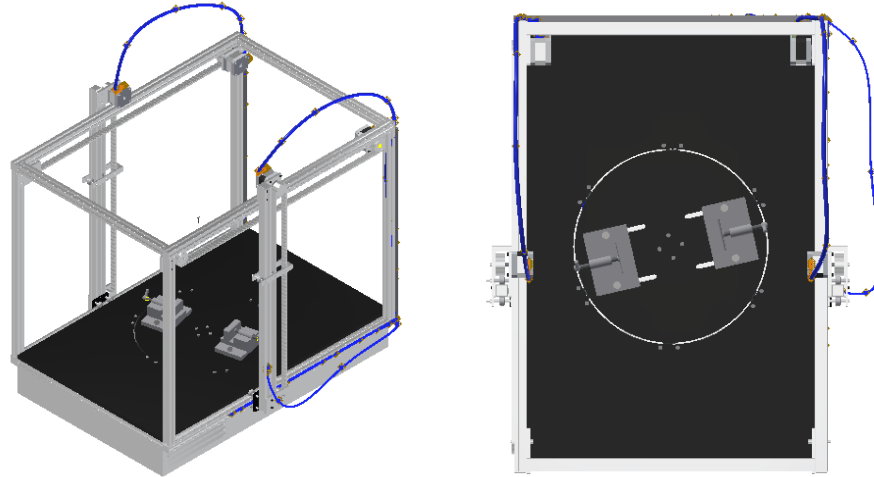


Figura 52. Diseño completo de la Cortadora de hilos CNC.

El resultado de analizar el proceso dinámico y cinemático de la máquina CNC, se obtuvo a partir del centro de gravedad del mecanismo y como resultado se obtuvo una fuerza de $F=0.632\text{ N}$ para movilizar la columna lateral del mecanismo y una fuerza de $F=0.166\text{ N}$ en la guía lineal en que fue determinada las ecuaciones (1.6) y (1.26), respectivamente.

El proceso de obtención del análisis cinemático se adquirió en la sección 5.18, la obtención del análisis cinemático comienza con la sumatoria de fuerzas aplicada en los mecanismos y esta expresada en un diagrama de cuerpo libre de la figura 45, dependiendo de la fuerza aplicada en función del tiempo se expresan las velocidades y aceleraciones del mecanismo y posteriormente es expresada en la figura 57 mediante software de simulación llamado Matlab, que interpreta el movimiento de los mecanismo en respuesta a una fuerza aplicada.

En la figura 53 se obtiene el análisis dinámico de la cortadora CNC en el simulador de Ansys, lo cual se determina la posición y la velocidad de en el movimiento prismático de las columnas laterales de la máquina como podemos observar en la figura la posición cambia al aplicar la fuerza necesaria calculada anteriormente. (Norton, 2013).

En la simulación observamos que no hay esfuerzos de elasticidad en la máquina que impidan el movimiento prismático de las columnas, además de no haber esfuerzos cortantes en las uniones de la cortadora. (Norton, 2013)

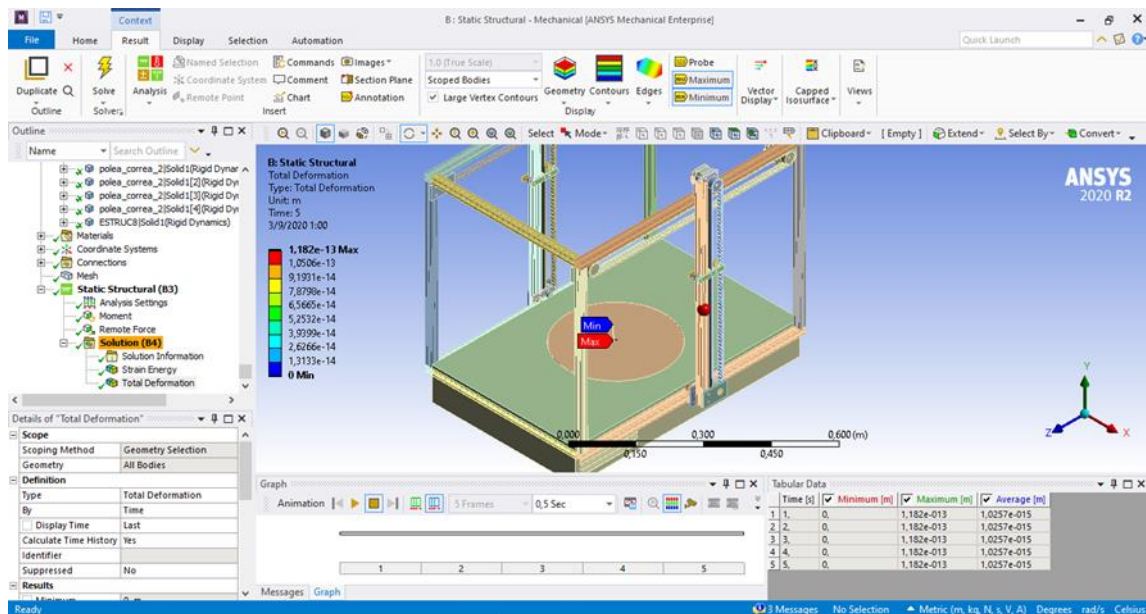


Figura 53. Simulación en Ansys del análisis estructural.

En la sección 5.12 expresa el análisis dinámico por medio del acoplamiento del sistema de control electromecánico a la máquina, como se muestra en la figura 54, en la figura 52 y 58 se incorpora el control de la planta al diseño mecánico por medio del simulador de Matlab, se observa cómo se comporta el sistema mecánico al incorporar el control del motor a pasos, en la figura 33 y 34 se demostró que el sistema de control responde correctamente al integrar un controlador PID en el sistema.

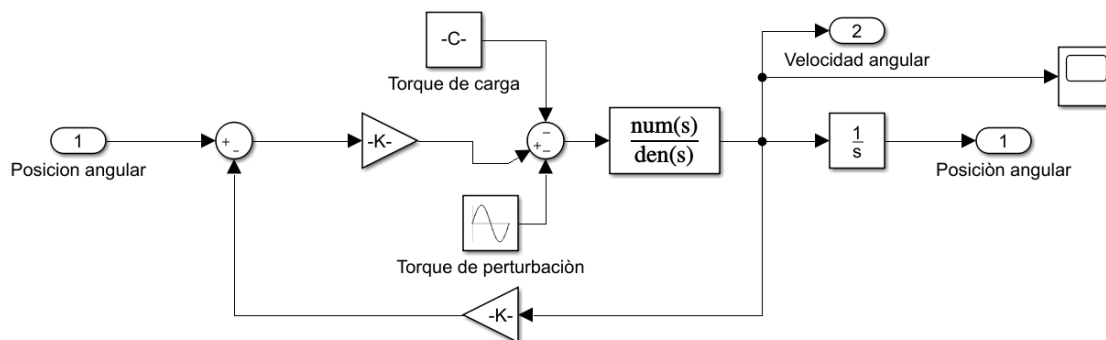


Figura 54. Sistema de la planta en el software de Simulink (Fuente, autor).

Las repuestas de control en cada uno de los motores son obtenidas previamente en la sección 5.12, la respuesta de la columna lateral y la respuesta de guía lineal se muestran en la figura 55 y 56, respectivamente.

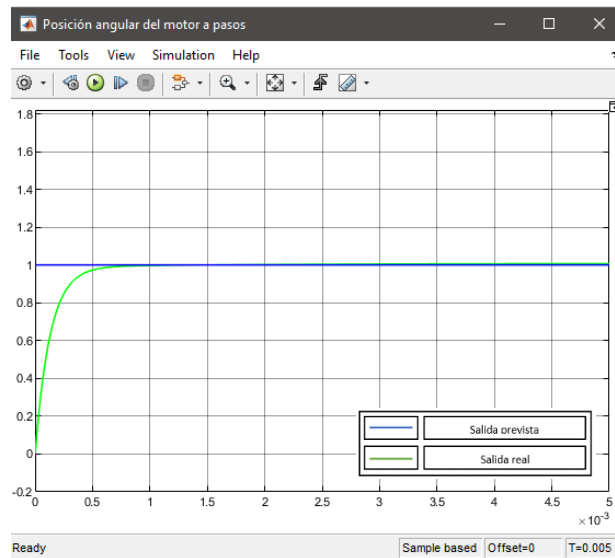


Figura 55. Reajuste de la respuesta real del sistema de la planta. (Fuente, autor).

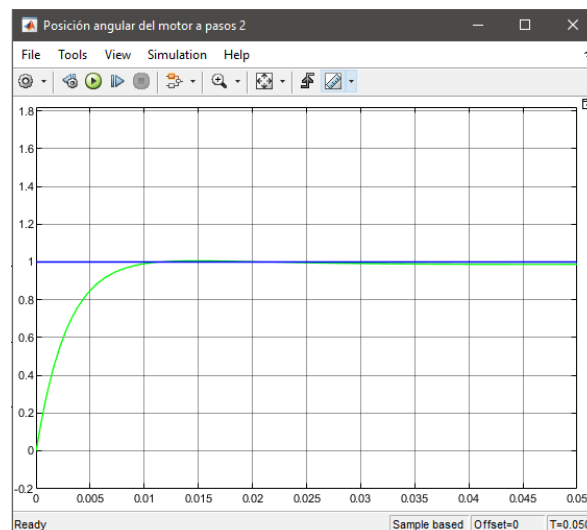


Figura 56. Reajuste de la respuesta real del sistema de la planta del segundo motor. (Fuente, autor).

Podemos observar que en la figura 57 el diseño del sistema mecánico se realizó en Simulink de Matlab, este diseño establece los movimientos cinemáticos de la máquina, los cuales se ha incorporado 2 juntas de traslación una en sentido vertical y otra en sentido horizontal. En la figura 58 se muestra el comportamiento de la máquina CNC, su centro de origen de coordenadas queda marcado en color de celeste, y en la figura 54 se muestra el sistema de control.

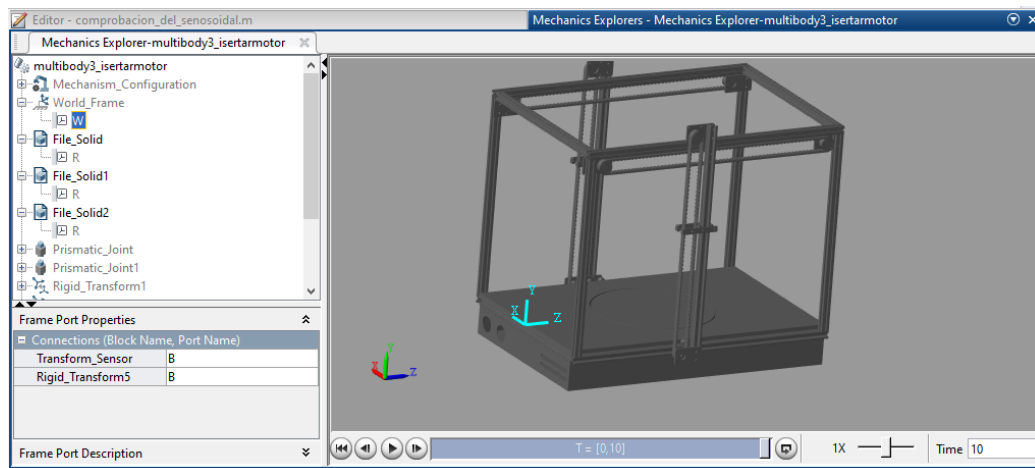


Figura 57. Validación del análisis cinemático y de control de la máquina (Fuente, autor).

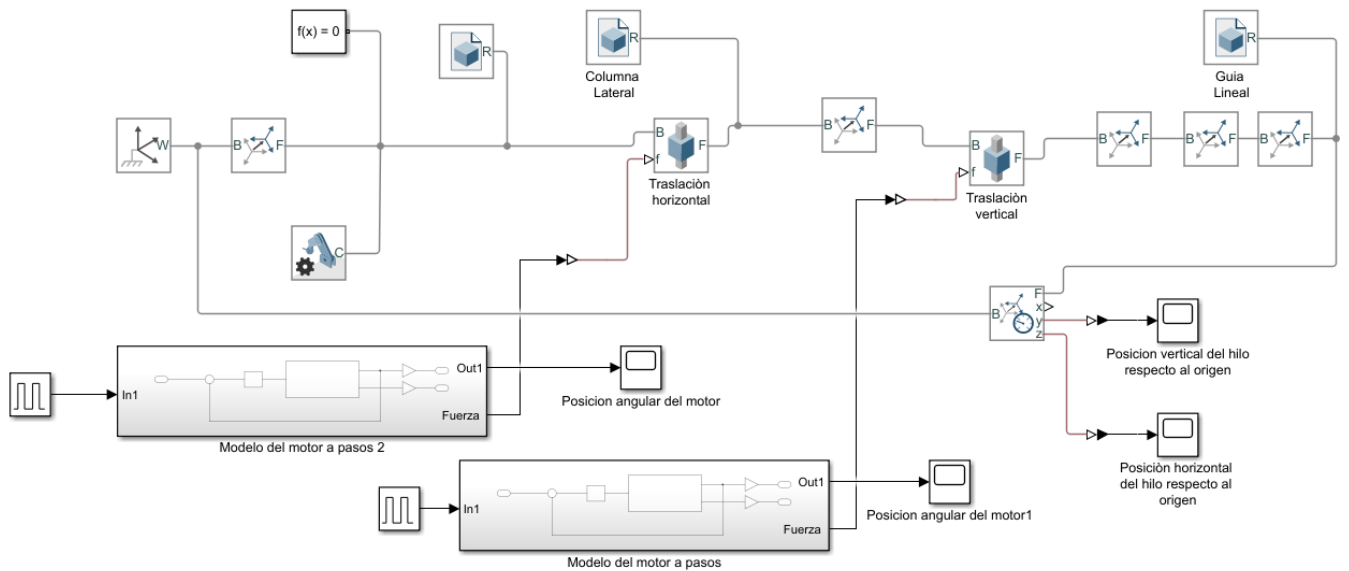


Figura 58. Sistema de control mecánico y electromecánico (Fuente, autor).

En la figura 59 y 60 se observa como el mecanismo de la guía lineal, el cual lleva el hilo, se desplaza en sentido vertical y horizontal respecto al origen que se impuso en la figura 58 en tiempo de 10 segundos.

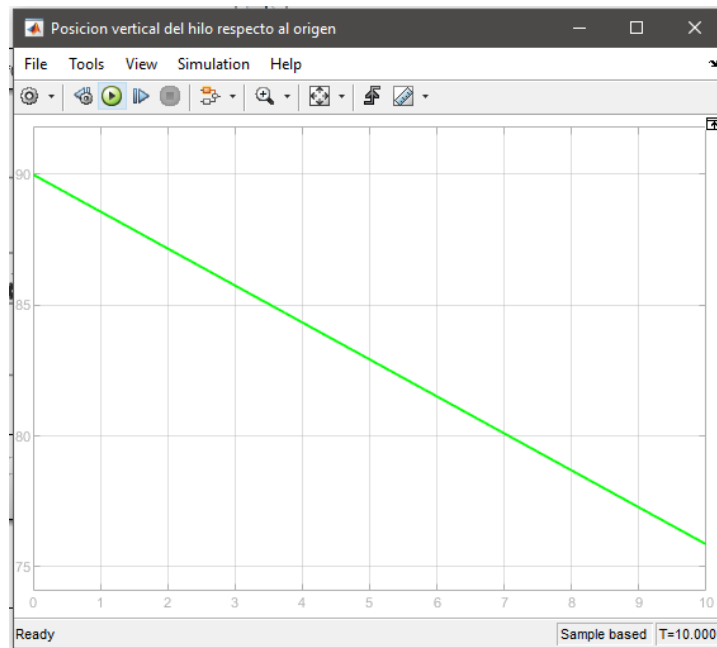


Figura 59. Posicionamiento de la guía lineal en sentido vertical. (Fuente, autor).

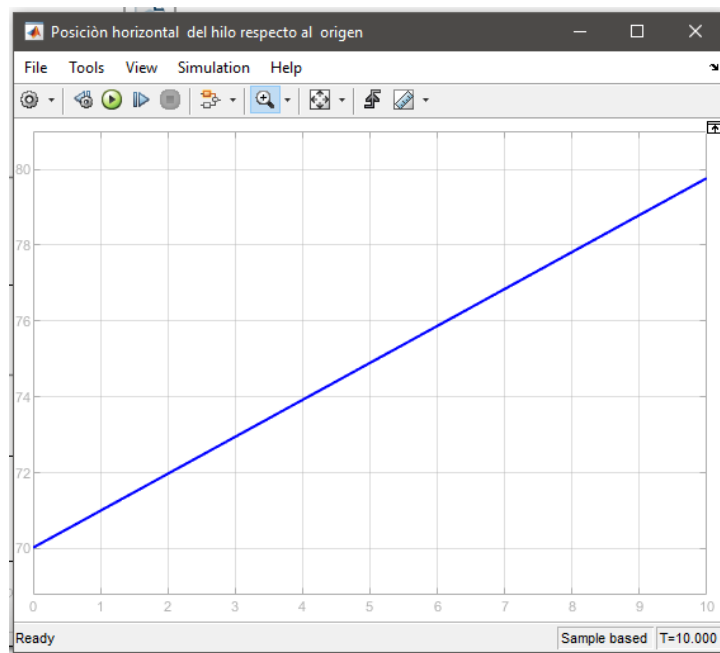


Figura 60. Posicionamiento de la guía lineal en sentido horizontal. (Fuente, autor).

a. Validación Circuito Esquemático

Se propuso desarrollar el diseño del circuito esquemático en el software Proteus para comprobar su funcionamiento de control y potencia dentro de los parámetros establecidos. En la siguiente imagen muestra el diseño implementado que controla cinco motores de pasos cada uno está representando cada eje de movimiento de la máquina CNC, cuatro motores controlan el movimiento de una columna lateral que sostiene el hilo y un motor el movimiento de la superficie de la plataforma en el eje z.

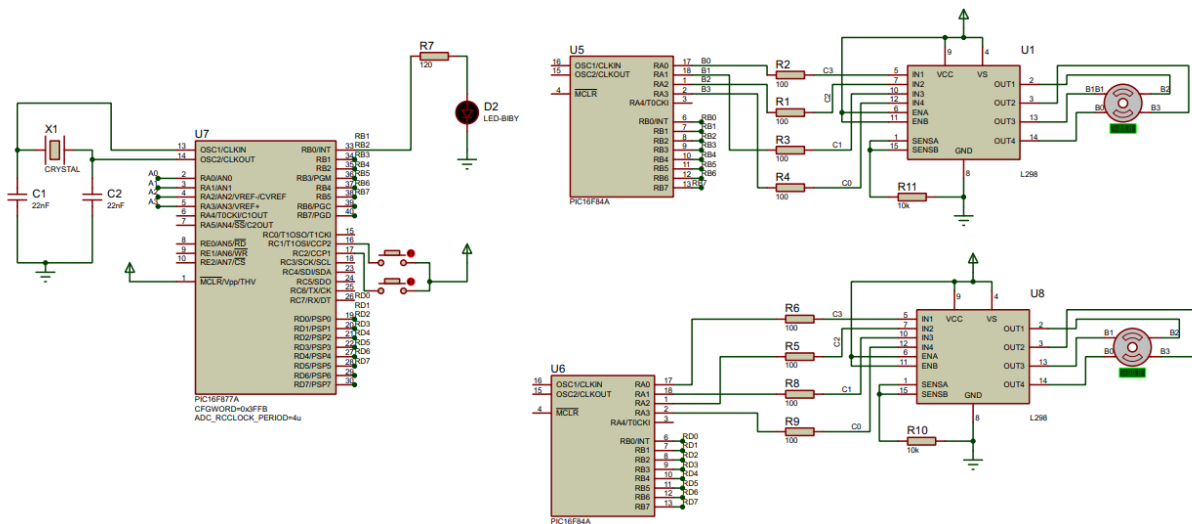


Figura 63. Simulación en Proteus del circuito electrónico (Fuente, autor).

En la figura 64 podemos ver la conexión del servidor en este caso es el funcionamiento del microcontrolador el cual recibe la señal del ordenador está conectado, se debe tomar en cuenta que el ordenador convierte el código G en un código de máquina que puede ser entendido por la máquina cortadora CNC y este a su vez envía el código de máquina al servidor, quien recepta y envía a los esclavos en forma de tramos todos en el mismo tiempo esto ayuda a que la máquina no pierda tiempos en el envío de datos.

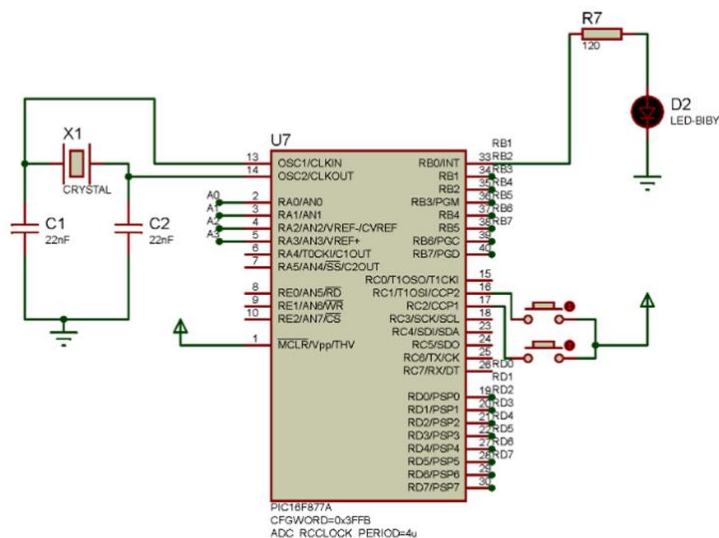


Figura 64. Simulación del maestro (Fuente, autor).

Cada uno de los esclavos están conectados a los motores promedio de un circuito de potencia como 1293 que alimenta los motores como se observa en la figura, podemos suponer que también se utiliza que circuitos de puente h para alimentar los motores de pasos, el problema es el costo y el espacio que ocupa cada circuito al diseñar varias tarjetas que van conectadas a los 5 motores de pasos, como muestra en la figura se observa el funcionamiento de los motores en el software de Proteus. (Sons, 2017).

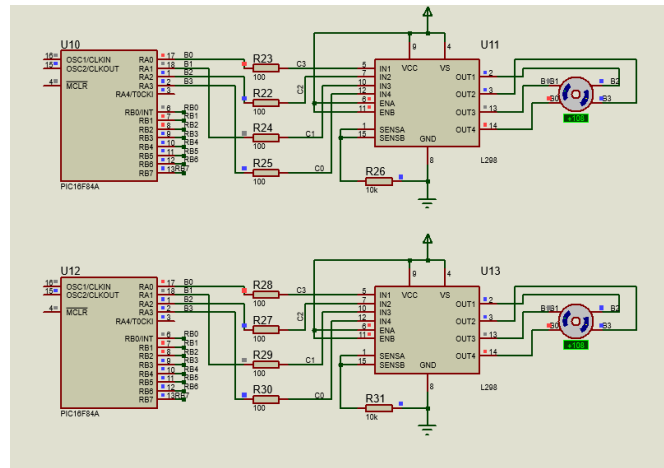


Figura 65. Simulación del esclavo (Fuente, autor).

b. Comprobación circuito esquemático

Se logrará la comparación del análisis mecánico, electrónico y de control, los datos calculados con los simulados, empleados en los simuladores adecuados, para comprobar el óptimo funcionamiento de los prototipos diseñados. (Jan Awrejcewicz, 2017). Se explicará cada uno de los procedimientos anteriores mediante una presentación mostrando los resultados obtenidos y las conclusiones que demostrarán si se pudo cumplir los objetivos planteados.

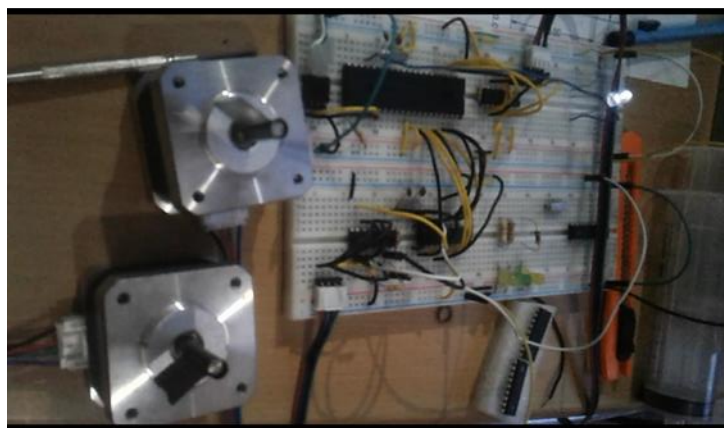


Figura 66. Implementación del circuito esquemático (Fuente, autor).

En la comprobación del sistema control y de sistema electrónico de potencia, se implementó un circuito donde demuestra el funcionamiento del control de los motores, al alimentar una fuente de 5 voltios para carga del circuito en la imagen muestra el acoplamiento de dos motores a pasos para comprobar el funcionamiento de movimiento angular, como se observa en la figura la implantación de solo dos motores a pasos, uno controla la posición de traslación lineal horizontal de la columna lateral de la cortadora de hilo CNC y el otro motor controla el movimiento de soporte de hilo de la guía de movimiento lineal.

c. Interfaz de la máquina y el usuario

Se ejecutó las órdenes de los motores de paso por medio de un software, que ayudará en la interacción del usuario con el prototipo, el programa deberá comprender el lenguaje de código G y transmitir los datos al circuito integrado en la tarjeta electrónica. (Kenjo, 1984). Se obtendrá en el proceso de manufactura, la adquisición y monitoreo de las variables de la máquina, mediante un sistema SCADA, producto de un software de ingeniería que tiene elevada capacidad de adquisición y procesamiento de datos. (Wilmschurst, 2007). En la figura 67 muestra el interfaz de usuario y de la máquina, se empieza por control de posicionamiento de la herramienta en este caso el hilo caliente en colocar en una posición con respecto al punto cero de las coordenadas de la máquina en los desplazamientos X, Y y Z, cuando se importe el programa del código G en la interfaz se proyecta el código en el panel de código, para la activación de inicio y paro se muestra en el control de mandos.

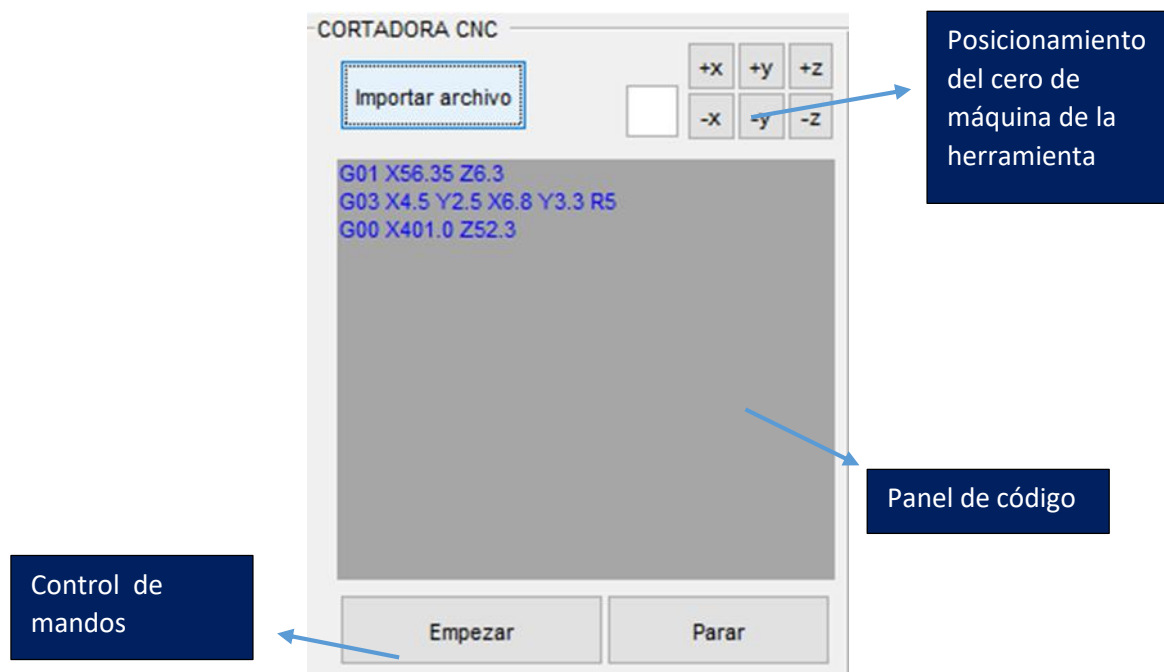


Figura 67. Interfaz gráfica (Fuente, autor).

Para la interacción de la máquina con el ordenador se conecta mediante la conexión de USB para arrancar el programa se requiere primero la conexión de la máquina al ordenador y después se arranca el programa para la detección de la máquina, se ingresa el comando de control de código G, el código G se crea a partir de un software de diseño CAD, todo el código se guarda en un archivo texto, después se ejecuta el programa en el botón importar, el código se muestra en el panel de código, programa comprueba si el programa esta correcto los comandos de ejecución, para empezar a realizar la ejecución del programa, se presiona el botón empezar para que se ejecute y envíe órdenes a la máquina cortadora CNC, mediante el envío de datos de las coordenadas del hilo caliente para mecanizar la pieza en bruto.

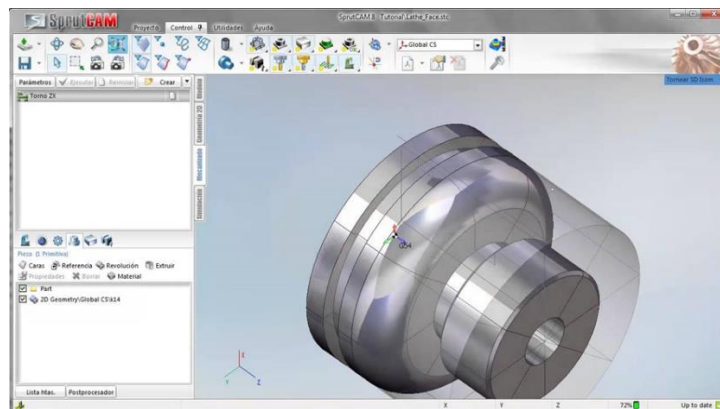


Figura 68. Utilización de software de diseño. (Noriega, 2018)

En la figura 46 detalla el software de diseño de CAD/CAM llamado Sprutcam que se caracteriza en crear el código G que reconoce la máquina cortadora de hilos CNC, el código se exporta en un archivo (.txt), que luego es ejecutado por el programa de la figura 63, donde muestra la interfaz del usuario y de la máquina. Se escogió este tipo de software ya que incorpora la simulación de una máquina cortadora de hilos en base al proceso de corte de mecanizado.

7. Análisis de costos

Según la tabla obtenemos el proceso de identificación de los recursos materiales necesarios para la construcción de la máquina cortadora de hilos CNC, los costos de cada uno de los recursos cuentan con utensilios, el equipo, los materiales.

Estos valores ayudan a determinar el costo para la elaboración del proyecto y el mantenimiento si es que lo dispone. En la tabla determinamos los materiales mecánicos para realizar la estructura mecánica.

Componentes	Dimensiones (mm)	Unidades	Costos c/u	Total
Perfiles de aluminio de 20x20	20x20x700 mm	2	\$15	\$30
	20x20x450 mm	2	\$10	\$20
	20x20x500 mm	2	\$10	\$20
	20x20x703 mm	2	\$15	\$30
Placa metalicas de aluminio	72x42x5 mm	8	\$15	\$120
Placa mini V	6.35x50x50 mm	2	\$25	\$50
Rueda V	12mm	8	\$1	\$8
Espaciadores de 1/4"	6 mm	8	\$1	\$8
Tornillos	M5x30mm	8	\$0,35	\$3
Rodamientos 625 2RS	Catalogo SNR	16	\$2	\$32
Banda Dentada	Catalogo megadyneegro	4	\$5	\$20
Piezas de ABS	Varios	10	\$12	\$120
Tabla de Madera	700x450x10mm	1	\$3	\$3
Lamina de acero	740x500x1mm	1	\$20	\$20
Tornillos	M5x60mm	50	\$0,53	\$27
Braket de esquina	20x20x17mm	10	\$6	\$60
			Total	\$570

Tabla 8. Análisis de costos utensilios mecánicos.

El total se aproxima a \$570 por la compra de los componentes mecánicos, el precio de cada uno de los componentes se multiplica por la cantidad de cada costo estos costos fueron tomados por la empresa el acero en la ciudad de cuenca.

El análisis de costos de los componentes electrónicos se muestra en la siguiente tabla se determina cada uno de los costos impuestos en el mercado tomados en las páginas de internet el total es de \$215 para la instalación de eléctrica y la activación de los actuadores presentes en el diseño de la cortadora de hilos CNC.

Componentes Electrónicos			
Nombres	Cantidad	C/u	Total
Fuente de alimentación 4 A	1	\$50	\$50
Motor a Pasos	5	\$20	\$100
L293	5	\$4,50	\$23
Pic16f877a	1	\$10	\$10
Pic16f628	2	\$10	\$20
Borneras de 4	2	\$0,50	\$1
Borneras de 2	2	\$0,50	\$1
Cristales de 4Mhz	3	\$0,60	\$2
Capacitores 22pf	6	\$0,25	\$2
Placa cobre 200X200 mm	1	\$4,50	\$5
Pines de 4	2	\$0,80	\$2
Cables Hembra-Hembra de 4	2	\$0,60	\$1
Alambre de resistencias Ferroniquel	1	\$30,00	\$30
Modulo Elevador de Voltaje	1	\$10,70	\$11
Resistencias 1,5kΩ	5	\$0,30	\$2
Capacitores 1mF	3	\$0,25	\$1
	Total		\$258

Tabla 9. Utensilios electrónicos.

Los costos indirectos fueron tomados de las máquinas que dependen del tiempo de uso de la misma, tomando en cuenta el consumo de energía y del pago de la máquina.

Costos indirectos			
Maquinas en uso	Tiempo en horas	Costo por horas	Total
Impresora 3D	56,8	\$5	\$284
Fresadora	20,6	\$7	\$144
Torno	12,9	\$7	\$90
Taladro	4,6	\$7	\$32
Sierra electrica	3,6	\$3	\$11
Sierra metalica	16,8	\$5	\$84
Transporte	60,6	\$2	\$121
		Total	\$767

Tabla 10. Costos indirectos

Los costos de manufactura van sumados los costos de utensilios mecánicos, electrónico y los costos indirectos estos costos van sumados directos a los costos totales.

Costos Totales de manufactura	
Utensilios mecánicos	\$570
Utensilios electrónicos	\$258
Costos indirectos	\$767
total	\$1.552

Tabla 11. Costos totales de manufactura.

Los costos totales es el resultado de todo el análisis financiero del proyecto de desarrollo de la cortado CNC, es la suma de los costos de manufactura, los costos de ingeniería y de utilidad, los costos de ingeniería dependen de los gastos por el operador o ayudante.

Costos Totales	
Costos totales de manufactura	\$1.552
Costos de ingeniería	\$776
Utilidad	\$776
Total	\$3.104

Tabla 12. Costos totales.

8. CONCLUSIONES

El diseño de una máquina industrial como cortadora de hilos CNC requiere un análisis fundamental que incorpore todas las ciencias de la Ingeniería, se aprecia el incorporar un análisis iterativo y ordenado para ser validado el diseño impuesto dentro de los parámetros de trabajo, obtener un estudio de investigación del estado del arte para diferentes tipos de modelos de cortadoras de hilos CNC, con la última actualización en la innovación de este tipo de máquinas, para conseguir la innovación en la empresa Plastex S.A. y asegurar la calidad y mejora de sus productos.

Se cumplió el diseño en cada uno de los análisis mecánico, eléctrico, Scada y de control mediante un software calificado para este tipo de procesamiento de datos lo que concreta un diseño de un sistema mecatrónico que contenga el funcionamiento viable y seguro, en el análisis mecánico se aportó con la determinación la cinemática y la cinética del diseño mecánico de la máquina para determinar la potencia necesaria de los motores pasos que dan movilidad a la cortadora, se incorporó el análisis de potencia electrónica de los motores y a su vez el diseño de la tarjeta electrónica, además se realizó la incorporación del sistema control de la planta de acuerdo a los parámetros que se obtuvieron en el análisis cinemático de los mecanismos.

En las observaciones del funcionamiento electrónico dio una respuesta positiva al accionamiento del control motores en la maquinaria, y obteniendo una respuesta robusta al sistema, en la simulación muestra como el comportamiento de los motores hacen frente a la carga de los mecanismos, como resultado el diseño mecatrónico puede ser aplicable a la implantación de la empresa.

En su validación cada uno de sus resultados matemáticos se realizó por medio de un software CAE como el software de Matlab y ANSYS, además de la validación de los circuitos electrónicos y de potencia para la activación de los motores a paso a paso, reconociendo la posibilidad del funcionamiento del diseño mecatrónico, en diferentes estados físicos y con implementación del funcionamiento correcto de los actuadores.

Por último, se estableció el análisis financiero para la realización de la cortadora de hilos CNC, por lo tanto, se puede apreciar que los costos para este dispositivo no superan al costo de una máquina en el mercado, lo que faculta la inversión en la implementación de está.

9. RECOMENDACIONES

La máquina CNC requiere que los motores paso a paso deben poseer un control robusto de velocidad y posición para la precisión de mecanizado en las superficies de la pieza, a su vez debe contener un sistema de potencia, todo esto se logra al análisis de cada uno de los sistemas mecatrónicos, cabe mencionar que no todo se realiza por diseño o inspección en un software se requiere la implementación aunque sea de una parte del diseño esto asegura la confiabilidad y la seguridad del funcionamiento de máquina cortadora de hilos CNC, es indispensable que los análisis anticipe el comportamiento de la máquina.

Para un mayor funcionamiento de la maquinaria es indispensable, que el tamaño de la cortadora este de acuerdo a las dimensiones de fabricación de la pieza del prototipo, además se requiere del uso aislado de la máquina fuera del proceso de fabricación de la pieza.

Para una mayor seguridad en el sistema electrónico es adecuado instalar por separado un sistema de protección de alto voltaje, en caso de que se presente una inestabilidad en la red eléctrica.

10. REFERENCIAS

- Allan H. Robbins, W. C. (2006, MARZO 26). ANÁLISIS DE CIRCUITOS Teoría y práctica. Retrieved from PLASTEX-S.A.: www.plastex.com.ec
- Asbjørn Søndergaard, J. F. (2016). Robotic Hot-Blade Cutting An Industrial Approach to Cost-Effective Production of Double Curved Concrete Structures. Springer International. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_11
- BERMAN, R. (2016).
- Consultants, H. O. (2009). Electromagnetic Compatibility Engineering. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Ferdinando, S. (2019, 07 31). nettuno. Retrieved from nettuno: <https://www.nettunosistemi.com/wp-content/uploads/2018/03/INFINITY-MW-1.jpg>
- Gaviño, I. R. (2010). Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- GUROCAK, H. (2016). INDUSTRIAL MOTION CONTROL . VANCOUVER, USA: WILEY.
- International, S. c. (2019). Catálogo General de Industria. Universo de SNR, 695.

- KENJO, T. (1984). STEPPING MOTORS AND THEIR MICROPROCESSOR CONTROLS. OXFORD: CLARENDON PRESS.
- ltd, H. S. (2006, Marzo 26). hotwiresystems. Retrieved from hotwiresystems: <https://hotwiresystems.com>
- Mejía Sierra, A. y. (2013). Desarrollo y construcción de una máquina (CNC) como aporte determinante en la competitividad industrial de la mipymes en colombia. como aporte determinante en la competitividad industrial de las mipymes en Colombia. Épsilon (20), 193-214.
- MONK, S. (2003). PRACTICAL ELECTRONICS FOR INVENTORS. NEYOR CHICAGO: MC GRAW HILL .
- Nisbett, R. G. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mc Graw Hill.
- Noriega. (2018, 08 25). sprutcam. Retrieved from sprutcam: <https://sprutcam.com/es/>
- Norton, R. L. (2013). Diseño de maquinaria-Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Mc Graw Hill.
- Ogata, K. (2004). Dinámica de sistemas. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Pearson Prentice Hall.
- Palm, W. J. (2014). System Dynamics. Avenue of the Americas, New York: McGraw-Hill.
- Plastex-S.A. (2006, 08 29). Plastex-S.A. Retrieved from Plastex-S.A.: <http://www.plastex.com.ec>
- Ricardo. (2020). Cortadora de hilos CNC. Cuenca.
- Salazar, I. M. (2020, 01 13). Procesos de inyección poli estireno. (R. N. Baquerizo, Interviewer)
- Smith, W. F. (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Ciudad de México: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V.
- Sons, J. W. (2017). Polymer Blends and Composites Chemistry and Technology. Beverly, MA 01915, USA: Wiley Global Headquarters.

Anexo C

Programación control PID

```
#include <16f877a.h>

#device ADC=1

#use delay(clock=4MHz)

#Byte TRISA

#FUSES XT, NOWDT

VOID MAIN(){ //lectura de entrada señal

INT20 VALOR; //valor del PWM

FLOAT A,B,C,D; //constantes del PID

INT15 CONTROL;

FLOAT RT,DT,YT,IT0,ET0,IT0,GT,KF,ET_0,ET_1; //variables de la ecuación

FOALT MAX, MIN; //variables de limites

MIN=0.0;

MAX=1050;

IT=0;

ET=0;

T=0.001;

A=44.62 // variables constantes del PID

B=7.18*T

C=28.11/T

VOLTAJE_LIMIT=1.5;

TRISA=0;

SETUP_TIMER_2(T2_DIV_Y_4.523,1);

SETUP_CCP1(CCP_PWM);

SETUP_ADC_PORTS(A);

SETUP_ADC(ADC_CLOCK_INTERNAL);

SET_ADC_CHANNEL(7); // Asignación del canal de Analógico

WHILE(1){

VALOR=READ_ADC(1); // lectura del valor analógico

YT=VALOR*5000.0/1024.0; // Conversión del voltaje

RT=VOLTAJE_LIMIT;

ET=RT-YT; // Cálculo de error
```

```

IT=B*ET+IT0; // Cálculo de término integral
DT=C*(ET-ET0); // Cálculo del término derivativo
UT=IT+A*ET+DT; // Cálculo de la salida del PID
IF (UT>MAX){
UT=MAX; //Salida del PID
ELSE {
IF (UT<MIN){
CONTROL=UT;
SET_PWM1_DUTY(CONTROL);
IT0=IT;
ET0=ET;
DELAY_MS(100);
};
ELSE
IF (UT<MIN){
DT=MIN+DT
ET0=ET;
}
}
CONTROL=UT;
SET_PWM1_DUTY(CONTROL); // Transferencia del PID al señal PWM
IT=IT0;
ET0=ET;
DELAY_MS(100);
}

}

}

```